НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

# ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ

2022, ТОМ 22, НОМЕР 3 (МАЙ–ИЮНЬ) ISSN 2226-1494 (PRINT), 2500-0373 (ONLINE)

**ОБЗОРНАЯ СТАТЬЯ**

Методы аудиовизуального распознавания людей в масках — *Косулин К.Э., Карпов А.А.* — 415

**ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ**

Влияние соотношения интенсивностей опорной и объектной волн на распределение интенсивности в формируемом с их помощью голографическом поле — *Корешев С.Н., Старовойтов С.О.* — 433

Высокоточный волоконно-оптический датчик температуры на основе интерферометра Фабри–Перо с отражающими тонкопленочными многослойными структурами — *Моор Я.Д., Коннов К.А., Плотников М.Ю., Волков А.В., Варжель С.В., Коннов Д.А., Стригалев В.Е.* — 442

Метод проектирования оптической системы для концентрации излучения мощных светодиодов (на англ. яз.) — *Романова Г.Э., Цяо Сюаньлинь, Козлова О.К.* — 450

Обнаружения выбоин на дорожных покрытиях с использованием методов фотограмметрии и дистанционного зондирования (обзор) (на англ. яз.) — *Абд Мукти Ш.Н., Тахар Х.Н.* — 459

**АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ И РОБОТОТЕХНИКА**

Адаптивное управление нелинейным объектом с несогласованными параметрическими неопределенностями и ограничением на входное воздействие — *Пашенко А.В., Герасимов Д.Н., Парамонов А.В., Никифоров В.О.* — 472

Применение методов детектирования отказов для обнаружения информационных атак на систему управления (на англ. яз.) — *Маргун А.А., Юрьева Р.А., Колесникова Д.В.* — 480

Алгоритм детектирования и локализации отказов двигателя постоянного тока — *Колесник Н.С., Маргун А.А.* — 492

Синтез и реализация λ -подхода скользящего управления в системе теплопотребления (на англ. яз.) — *Шилин А.А., Букреев В.Г., Перевощиков Ф.В.* — 501

**НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ И НАНОТЕХНОЛОГИИ**

Фотокаталитические свойства наноструктур Ag–AgBr в ионообменном слое натриево-цинк-алюмосиликатного стекла с бромом — *Марасанов Д.В., Сгибнев Е.М., Никоноров Н.В.* — 509

**КОМПЬЮТЕРНЫЕ СИСТЕМЫ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ**

Формализация языков частично упорядоченных мультимножеств в системе Coq для спецификации слабых моделей памяти — *Моисеенко Е.А., Гладштейн В.П., Подкопаев А.В., Кознов Д.В.* — 517

Облачная интеллектуальная система мониторинга для обнаружения нарушений ношения маски и выдачи предупреждений (на англ. яз.) — *Комал Венугопал В., Лалит М., Арун Кумар Т., Джаяшри Д., Виджаяшри Д.* — 528

Эффективная инкрементная хеш-цепочка с вероятностным методом на основе фильтра для обновления легких узлов блокчейна (на англ. яз.) — *Маалла М.А., Беззатеев С.В.* — 538

Метод генерации масок на изображениях лиц и системы их распознавания — *Кухарев Г.А., Рюмина Е.В., Шульгин Н.А.* — 547

Повышение эффективности обработки жестового языка посредством малокадрового машинного обучения — *Шовкопляс Г.Ф., Строков Д.А., Казанцев Д.В., Ватьян А.С., Асадулаев А.А., Томилов И.В., Шалыто А.А., Гусарова Н.Ф.* — 559

Комплекснозначное разложение матричных данных на принципах квантовой теории — *Кожиссери Ш., Суров И.А.* — 567

Моделирование базового переводчика индонезийского языка жестов на одноплатном компьютере Raspberry Pi (на англ. яз.) — *Фадлила У., Прасетьо Р.А.Р., Махамад А.К., Хандага Б., Саон Ш., Судармила Э.* — 574

Метод многомодального машинного сурдоперевода для естественного человеко-машинного взаимодействия — *Аксёнов А.А., Кагиров И.А., Рюмин Д.А.* — 585

Веб-приложение для быстрой оценки субъективных ответов с использованием обработки естественного языка (на англ. яз.) — *Минакши Анураг Т., Прадип Б.М., Вишака М.* — 594

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ**

Обоснование путей построения и оценка эффективности применения пространственно распределенной системы информационных сенсоров для мониторинга обстановки — *Зюзин А.В., Кныш М.В., Разиньков С.Н., Тимошенко А.В.* — 600

Мониторинг инфильтрационных процессов в гидротехнических сооружениях с использованием распределенного акустического сенсора (на англ. яз.) — *Тимофеев А.В., Грознов Д.И.* — 610

Конструкция волноводной антенны с прорезями для морской радиолокационной системы (на англ. яз.) — *Риаз П., Ашутош Т.* — 623

**Главный редактор — В.О. Никифоров,** д.т.н., профессор

**РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ**

**Беззатеев С.В.** — д.ф.-м.н., доцент (Россия)
**Беликов А.В.** — д.ф.-м.н., профессор (Россия)
**Бессмертный И.А.** — д.т.н., профессор (Россия)
**Бобцов А.А.** — д.т.н., профессор (Россия)
**Бухановский А.В.** — д.т.н. (Россия)
**Волков К. Н.** — д.ф.-м.н. (Великобритания)
**Дукельский К.В.** — к.т.н., доцент (Россия)
**Ефимов Д.В.** — PhD (Франция)
**Заколдаев Д.А.** — к.т.н., доцент (Россия)
**Иорш И.В.** — д.ф..-м.н. (Россия)
**Кармановский Н.С.** (заместитель главного редактора) — к.т.н. доцент (Россия)
**Комаров И.И.** — к.ф.-м.н., доцент (Россия)
**Никоноров Н.В.** — д.т.н., профессор (Россия)
**Полищук Г.С.** — к.т.н. (Россия)
**Романов А.Е.** — д.ф.-м.н., профессор (Россия)
**Сидоркина И.Г.** — д.т.н., профессор (Россия)
**Степанов О.А.** — д.т.н., профессор (Россия)
**Татарникова Т.М.** — д.т.н., доцент (Россия)
**Тимофеев А. В.** — д.т.н. (Казахстан)
**Успенская М.В.** — д.т.н., профессор (Россия)
**Цыпкин А. Н.** — д.ф.-м.н. (Россия)

**Ответственный секретарь — И.В. Малькова**

Издание зарегистрировано в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (свидетельство ПИ №ФС77-67990 от 6 декабря 2016 г.).

Языки журнала: русский, английский.

ISSN 2226-1494 (print version), ISSN 2500-0373 (online version)

Англоязычное название: «Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics». Транслитерированное название: «Nauchno-Tekhnicheskii Vestnik Informatsionnykh Tekhnologii, Mekhaniki i Optiki». Сокращенное название: «Sci.Tech. J. Inf. Technol. Mech. Opt.»

Журнал включен в каталог периодических изданий Ulrich's Periodical Directory.

Журнал входит в крупнейшие международные реферативные и наукометрические базы Scopus, EBSCO, ProQuest, EastView, ИВИС и другие.

Журнал входит в утвержденный Высшей аттестационной комиссией «Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, выпускаемых в Российской Федерации, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук».

Периодичность издания — 6 выпусков в год.

**Плата за публикации и редактирование не взимается.**

Редакторы: Ю.В. Михайлова, Л.Н. Точилина, Т.В. Точилина
Перевод — Н.А. Корнев
Компьютерная верстка — Е.С. Егорова

Оф. 2136, Университет ИТМО, ул. Ломоносова., д. 9,
Санкт-Петербург, Российская Федерация, 191002

Телефон (812) 480 02 75
http://ntv.ifmo.ru
E-mail: ntvitmo@itmo.ru

Статьи Журнала доступны по лицензии Creative Commons «Attribution-NonCommercial» 4.0 Всемирная.

**Editor-in-Chief — Vladimir O. Nikiforov,** D.Sc, Professor

**EDITORIAL BOARD**

**Sergey V. Bezzateev** — D.Sc, Associate Professor (Russia)
**Andrey V. Belikov** — D.Sc, Professor (Russia)
**Igor A. Bessmertny** — D.Sc, Professor (Russia)
**Alexey A. Bobtsov** — D.Sc, Professor (Russia)
**Alexandr V. Boukhanovsky** — D.Sc (Russia)
**Konstantin N. Volkov** — D.Sc (Great Britain)
**Konstantin V. Dukelskii** — PhD, Associate Professor (Russia)
**Denis V. Efimov** — PhD (France)
**Danil A. Zakoldaev** — PhD, Associate Professor (Russia)
**Ivan V. Iorsh** — D.Sc (Russia)
**Nikolai S. Karmanovskiy** (Deputy Chief Editor) — PhD, Associate Professor (Russia)
**Igor I. Komarov** — PhD, Associate Professor (Russia)
**Nikolay V. Nikonorov** — D.Sc, Professor (Russia)
**Grigorii S. Polishchuk** — PhD (Russia)
**Alexey E. Romanov** — D.Sc, Professor (Russia)
**Irina G. Sidorkina** — D.Sc, Professor (Russia)
**Oleg A. Stepanov** — D.Sc, Professor (Russia)
**Tatiana M. Tatarnikova** — D.Sc, Associate Professor (Russia)
**Andrey V. Timofeev** — PhD (Kazakhstan)
**Mayya V. Uspenskaya** — D.Sc, Professor (Russia)
**Anton N. Tcypkin** — D.Sc, Professor (Russia)

**Executive secretary — Irina V. Malkova**

Publication is registered by the Federal Inspectorate Service for Communication, Information Technologies and Communication Media, certificate PI FS77-67 990 dated December, 6th, 2016.

Languages of the journal: Russian, English

ISSN 2226-1494 (print version), ISSN 2500-0373 (online version) The English title is "Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics".

Transliterated title is "Nauchno-Tekhnicheskii Vestnik Informatsionnykh Tekhnologii, Mekhaniki i Optiki".

Abbreviated parallel title: "Sci.Tech. J. Inf. Technol. Mech. Opt."

The journal is catalogued in Ulrich's Periodical Directory.

The journal is included in the largest international abstract and scientometric databases Scopus, EBSCO, ProQuest, East View, EVIS and others.

The journal is included in the "List of leading scientific journals and periodicals under review in the Russian Federation, where the main scientific results of theses for the PhD and doctor of sciences degree must be published" approved by the Higher Attestation Commission.

Publication frequency is 6 times a year.

**Publication and editing are free of charge.**

Editors: Yulia V. Mikhailova, Lyubov N. Tochilina, Tatiana V. Tochilina
English Language Technical Editor — Nikolay A. Kornev
Computer layout — Ekaterina S. Egorova

of. 2136, ITMO University, Lomonosova Street, 9,
St.Petersburg, 191002, Russia

Phone (812) 480 02 75
http://ntv.ifmo.ru/en
E-mail: ntvitmo@itmo.ru



Подписано к печати 01.06.2022 Тираж 350 экз. Заказ № 87 (139)

Отпечатано в учреждении «Университетские телекоммуникации»
Адрес: 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д. 49, литера А

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ
май–июнь 2022 Том 22 № 3 http://ntv.ifmo.ru/
SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL OF INFORMATION TECHNOLOGIES, MECHANICS AND OPTICS
May–June 2022 Vol. 22 No 3 http://ntv.ifmo.ru/en/
ISSN 2226-1494 (print) ISSN 2500-0373 (online)

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК УНИВЕРСИТЕТ ИТМО
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ

ОБЗОРНАЯ СТАТЬЯ

REVIEW PAPER

doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-3-415-432

УДК 004.932.2

# Методы аудиовизуального распознавания людей в масках

**Кирилл Эдгарович Косулин[1]✉, Алексей Анатольевич Карпов[2]**

[1,2] Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация
[1] Филиал ООО «Люксофт Профеншнл» в городе Санкт-Петербурге, Санкт-Петербург, 195027, Российская Федерация
[2] Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук, Санкт-Петербург, 199178, Российская Федерация

[1] leliclalelic@yandex.ru✉, https://orcid.org/0000-0002-1324-2813
[2] karpov@iias.spb.su, https://orcid.org/0000-0003-3424-652X

**Аннотация**

**Предмет исследования.** В современном мире очень распространены случаи ношения людьми различных масок, респираторов и одежды на лице. Начавшаяся в 2019 году пандемия новой коронавирусной инфекции существенно увеличила применимость масок в общественных местах. Наиболее эффективными способами бесконтактного распознания личности являются методы идентификации и верификации человека по изображению лица и по записи голоса. Автоматические системы распознавания личности столкнулись с новыми проблемами из-за перекрытия большей части лица маской. Наличие данной проблемы определяет актуальность исследований в области распознания лиц в масках. Предмет исследования работы — системы и корпусы данных для распознавания личности людей в масках. **Метод.** Рассмотрены и проанализированы основные современные подходы и методы распознавания личности людей в масках, использующие изображения лица, записи голоса человека и аудиовизуальные методы. Приведен сравнительный анализ существующих корпусов данных, содержащих изображения и записи голосов людей, необходимые для создания систем распознавания личности. **Основные результаты.** Результаты анализа показали, что среди методов, использующих изображения лиц, наиболее эффективными являются методы, построенные на основе сверточных нейронных сетей, которые применяют область маски для извлечения признаков о геометрии лица. Популярные методы на основе x-векторов показали незначительное падение эффективности, что позволяет сделать вывод об их применимости в задачах распознавания личности говорящего в маске. **Практическая значимость.** На основании полученных выводов сформулированы требования к перспективным системам распознавания личности и определены актуальные направления для дальнейших исследований в данной области.

**Ключевые слова**

распознавание личности, лицевая биометрия, голосовая биометрия, медицинские маски, средства индивидуальной защиты, аудиовизуальные характеристики, объединение информации

**Благодарности**

Работа выполнена при поддержке фонда РФФИ (проект № 20-04-60529), Совета по грантам Президента РФ (грант № НШ-17.2022.1.6), а также в рамках бюджетной темы (№ 0073-2019-0005).

**Ссылка для цитирования:** Косулин К.Э., Карпов А.А. Методы аудиовизуального распознавания людей в масках // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2022. Т. 22, № 3. С. 415–432. doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-3-415-432

© Косулин К.Э., Карпов А.А., 2022

# Methods for audiovisual recognition of people in masks

**Kirill E. Kosulin[1]✉, Alexey A. Karpov[2]**

[1,2] ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation
[1] Luxoft Branch, Saint Petersburg, 195027, Russian Federation
[2] Saint Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS), Saint Petersburg, 199178, Russian Federation

[1] leliclalelic@yandex.ru✉, https://orcid.org/0000-0002-1324-2813
[2] karpov@iias.spb.su, https://orcid.org/0000-0003-3424-652X

**Abstract**
In the modern world, wearing masks, respirators and facial clothes is very popular. The novel coronavirus pandemic that began in 2019 has also significantly increased the applicability of masks in public places. The most affective person recognition methods are identification by face image and voice recording. However, person recognition systems are facing new challenges due to masks covering most of the subject's face. Existence of new problems for intelligent systems determines the relevance of masked person recognition systems research, therefore the subject of the study is the systems and datasets for masked people recognition. The article discusses analysis of the main approaches to masked people identity recognition: masked face recognition, masked voice recognition and audiovisual methods. In addition, this article includes comparative analysis of images and recordings datasets required for person recognition systems. The results of the study showed that among the methods that use face images the most effective are methods based on convolutional neural networks and the mask area feature extraction. The methods of x-vector analysis showed a slight drop in efficiency which allows us to conclude that they are applicable in the tasks of recognizing the identity of a speaker in a mask. Results of this study help with formulation of requirements for perspective masked person recognition systems and determining directions for further research.

**Keywords**
person recognition, facial biometrics, voice biometrics, medical masks, personal protective equipment, audiovisual features, information fusion

**Acknowledgements**
This work was partially supported by the RFBR (project No. 20-04-60529), by the Council for Grants of the President of Russia (grant No. NSH-17.2022.1.6), as well as by the Russian state research (No. 0073-2019-0005).

**For citation:** Kosulin K.E., Karpov A.A. Methods for audiovisual recognition of people in masks. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2022, vol. 22, no. 3, pp. 415–432 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-3-415-432

## Введение

Распознавание личности по лицу и голосу является самым популярным и перспективным направлением развития биометрических технологий. По данным J'son & Partners Consulting к концу 2018 года доля технологий распознавания лиц и голоса в общем объеме российского биометрического рынка составила почти 85 %, а в течение четырех лет до этого этот сегмент показывал рост на уровне 106,7 % в год [1]. Идентификация личности по лицу и голосу используется в интеллектуальных системах смартфонов, банков и предприятий. Важной частью поимки преступников в современном мире является идентификация личности с помощью общественных камер видеонаблюдения. Для распознавания преступников могут быть использованы записи голоса, реальные изображения и фотороботы [2].

В реальных условиях лицо человека может быть закрыто маской или различными предметами одежды. Преступники часто намерено скрывают свое лицо, как и во время совершения преступления, так и при нахождении на публике. Ношение респираторов и средств индивидуальной защиты обязательно для определенных рабочих и служащих, что может препятствовать распространению биометрических систем на некоторых предприятиях и затруднить распознавание личности этих людей в общественных местах. Часто в северных регионах в холодное время лицо может быть закрыто шарфами, балаклавой или другой одеждой, а в некоторых восточных странах женщины обязаны носить одежду частично или полностью закрывающее лицо.

В начале 2020 года мир столкнулся с новой пандемией коронавирусной инфекции COVID-19. Факторы отсутствия лекарств и постоянная мутация вируса не оставляют надежд на оптимистичные прогнозы по поводу конца пандемии. Даже по самым оптимистичным прогнозам пандемия продолжится многие годы. Одной из самых важных мер для уменьшения распространения COVID-19 является ношение средств индивидуальной защиты, в частности медицинской маски, в общественных местах. В связи с этим ношение медицинских масок распространилось повсеместно, создавая существенные проблемы для биометрических систем.

Технологии распознавания личности по лицу и голосу оказались практически бесполезны для идентификации людей, лица которых закрыты различными масками. Используемые методы разрабатывались и тестировались в доковидную эру, когда маски не были так распространены. Данное утверждение подтверждает анализ, проведенный экспертами из Американского национального института стандартов и технологий (NIST), которые провели сравнение эффективности 89 алгоритмов распознания лиц на изображениях в масках [3]. Точность алгоритмов с маскированными лицами существенно снизилась по всем направлениям. Самые точные рассмотренные алгоритмы не могут аутентифицировать человека без маски примерно в 0,3 % случаев.

При использовании изображений лиц в масках частота ошибок увеличивается до 50 %.

В большинстве случаев при обработке изображения лица в маске алгоритмы часто не могут корректно обработать область лица. Авторы отчета [2] называют данное явление «отказом регистрации» (Failure to enrol, FTE). Алгоритмы распознавания лиц обычно работают, выделяя признаки частей лица, например, их размер и расстояние друг от друга. Ошибка FTE означает, что алгоритм не может достаточно хорошо выделить черты лица, чтобы провести эффективное сравнение.

Важная задача интеллектуальных систем — анализ голосовых характеристик людей. Помимо лексической информации, речевой сигнал передает информацию о личности говорящего, эмоциональном состоянии, акустической среде, языке и акценте. Распознавание говорящего — важная область современных биометрических систем. Голосовая аутентификация применяется во многих системах безопасности. Судебно-криминалистический анализ голоса использует записи с места преступления для поимки преступников. Данные системы также сталкиваются с новыми проблемами при обработке голоса, искаженного защитной маской. В зависимости от материала маски и уровня контакта с органами артикуляции маска различным образом влияет на речевой сигнал, так как часть звуковой энергии поглощается маской, что выражается в искажении сигнала и уменьшении его энергии.

## Постановка задачи

Система аутентификации, использующая один биометрический канал, такой как речь или изображение лица, называется одномодальной системой. Часто полученный для классификации образ может быть низкого качества по следующим причинам: некорректного ракурса, недостаточного освещения, наличия фонового шума или низкого пространственного и временного разрешения видео. Проблема повышения качества решается путем использования бимодальной системы, обрабатывающей несколько биометрических потоков данных.

Аудиовизуальные системы вывели мультимодальную биометрию на новый уровень благодаря использованию дополнительной биометрической информации, извлеченной одновременно из голоса и изображения лица человека. Бимодальные биометрические системы эффективны и удобны в использовании, так как часто возможно записать голос и изображение одновременно. Для этого может быть использована видеокамера смартфона, пропускного пункта или наружного слежения.

В настоящее время в отрытом доступе нет полноценных систематических исследований, посвященных аудиовизуальной идентификации людей в масках. Это можно объяснить тем, что повседневное распространение масок в большинстве стран, включая Россию, началось только два года назад. Однако имеется значительное количество публикаций, посвященных одномодальному распознаванию личности по изображениям и голосу. Также методы бимодальной идентификации хорошо исследованы и показывают высокую эффективность в биометрических задачах. Эти две модальности позволяют использовать бимодальные методы для объединения изученных одномодальных систем для работы с масками.

Цель работы — аналитический обзор актуальных подходов распознавания личности людей в новых условиях, подразумевающих постоянное ношение средств индивидуальной защиты. Для достижения данной цели необходимо выполнить сравнительный анализ:

— корпусов данных видео- и аудиоинформации для решения задач распознавания личности в индивидуальной защите;
— методов распознавания личности в индивидуальной защите по видео- и аудиоинформации;
— методов бимодального аудиовизуального распознания людей и исследование применимости их к задачам идентификации людей в индивидуальной защите.

## Системы распознания личности в маске по изображению

Разработки технологий искусственного интеллекта в последние 10–15 лет существенно развились в области биометрических систем. Предложено множество методов, реализованных в практических приложениях. Распознание личности по изображению лица — передовое направление исследований в области биометрической идентификации. Преимущество данных систем — простота применения, что достигается за счет повсеместного размещения камер.

В современном мегаполисе установлено огромное количество камер слежения, часто камеры устанавливаются непосредственно на объект, к которому будет предоставляться доступ посредством лицевой биометрии. В связи с распространением ношения масок в последние два года алгоритмы распознавания лиц столкнулись с новой нерешенной задачей. Методы, используемые для идентификации лиц без масок, плохо работают или совсем не работают для идентификации лиц в масках. Возникает потребность в дополнительных исследованиях и разработке новых эффективных методов и моделей, для обучения которых необходимы расширенные корпусы изображений людей в средствах индивидуальной защиты.

## Корпусы изображений для распознания личности в маске

После распространения COVID-19 по всему миру и начала повсеместного ношения масок возникла необходимость в расширенных корпусах изображений людей в масках для решения новых задач компьютерного зрения. Основные две задачи, связанные с анализом изображений людей в средствах индивидуальной защиты: распознавания (детектирование) наличия маски на лице человека и распознавание (идентификация или верификация) личности человека в маске.

Предположение о том, что можно использовать одни и те же корпусы данных для обеих задач не вполне верно. Для детекции наличия маски на лице человека

подойдет любое изображение человека в маске, однако, для идентификации человека по его лицу, корпус должен быть размечен определенным образом. Для обучения алгоритмов распознания лиц субъект на изображении должен быть идентифицирован, и он должен встречаться достаточное количество раз в различных ракурсах, условиях освещенности и одежде для корректного обучения, валидации и тестирования модели.

В [4] представлен аналитический обзор аудиовизуальных систем для определения средств индивидуальной защиты на лице человека, приведен обширный анализ и сопоставление 13 известных корпусов людей в защитных масках. Результаты данного анализа представлены в работе [3]. Однако из данных корпусов изображений для задачи распознания лиц подходит только Real-World Masked Face Recognition Dataset (RMFRD) [4], в остальных базах данных изображений субъекты не аннотированы. Авторы работы [5] представили три корпуса изображений людей в индивидуальной защите: The Masked Face Detection Dataset (MFDD), RMFRD и Masked Face Recognition Dataset (SMFRD). Корпус MFDD включает 24 771 изображение лиц в масках для алгоритмов определения наличия маски. RMFRD содержит 5000 изображений 525 человек в масках, и 90 000 изображений тех же людей без масок. RMFRD — самый большой корпус реальных данных для задач распознавания лиц в масках. Создание большого корпуса для распознавания лиц очень трудоемкая и ресурсозатратная задача. Распознание лиц — популярная область компьютерного зрения, и за время существования этой проблемы возникло достаточное количество корпусов изображений для ее решения. Однако ношение масок стало массово практиковаться только в последние годы, и сейчас существует недостаток качественных баз данных изображений для идентификации людей в масках. Многие исследователи применяют методы синтеза искусственных изображений, в работе [5] рассмотрен данный метод. Для достижения большего разнообразия изображений авторы создали дополнительный корпус SMFRD, который состоит из 500 000 изображений лиц в синтезированных масках.

Корпус данных Masked Face Segmentation and Recognition (MFSR) [6] состоит из двух частей. Первая часть включает 9742 изображения лиц в масках, которые собраны из Интернета. Вторая часть включает 11 615 изображений 1004 личностей, которые сделаны в реальных условиях.

Корпус данных The Synthetic CelebFaces Attributes (Synthetic CelebA) состоит из 10 000 общедоступных синтетических изображений. Для создания данного корпуса в работе [7] синтезированы изображения и добавлены маски из базового корпуса CelebA, который содержит 200 000 изображений знаменитостей. Корпус сгенерирован с использованием 50 типов синтетических масок различных размеров, форм, цветов и структур. Для создания синтетических изображений лицо выровнено по координатам глаз, а затем маска наложена вручную с помощью Adobe Photoshop.

Корпус данных Synthetic Face-Occluded Dataset [8] также создан с использованием общедоступных корпусов CelebA и CelebA-HQ, последний состоит из 30 000 изображений знаменитостей. Отличие CelebA-HD от CelebA состоит в том, что на первом представлены изображения в разрешении HD 1024 × 1024 пикселов. Каждое изображение лица выровнено по положению глаз. Окклюзии синтезированы добавлением одного из пяти объектов, обычно закрывающих лицо: рук, маски, солнцезащитных очков, микрофона. Более 40 различных видов каждого объекта разных размеров, форм, цветов и структур нанесены на лица случайным образом.

Корпус данных MS1MV2 [9] представляет собой модифицированную версию корпуса данных MS-Celeb1M. MS1MV2 включает 58 млн изображений 85 000 различных личностей. Авторы работы [10] произвели добавление масок на изображения из корпуса MS1MV2 и создали версию MS1MV2-Masked. Тип и цвет маски выбраны случайным образом для каждого изображения, чтобы обеспечить большую вариативность обучающих данных. Подмножество из 5000 изображений случайным образом выбрано из MS1MV2-Masked для верификации модели. На этапе тестирования авторы использовали два корпуса данных реальных лиц в масках: MFR2 [11] и EMFR [12]. MFR2 состоит из 269 изображений 53 личностей, взятых из Интернета, корпус включает в себя в среднем по пять изображений на человека в средствах индивидуальной защиты и без них.

Корпус EMFR собран с помощью 48 участников, которые использовали личные веб-камеры для создания изображений [13]. Запись происходила в течение трех сеансов. Авторами создано несколько вариаций корпусов данных. На изображениях участники были в масках. Данная часть корпуса получила название – проба в масках (mask probe).

В работе [13] предложен корпус данных The Labeled Faces in the Wild (LFW), который состоит из 50 000 изображений реальных людей без масок и предназначен для алгоритмов распознания лиц. Авторы работы [11] создали модификацию LFW-SM, которая содержит 13 233 изображения 5749 человек с добавлением смоделированных масок.

Аналогичными синтетическими способами созданы корпусы MFV и MFI [14], BUAA-VisNir [15], VGG-Face2_m [16], CASIA-FaceV5_m [16] и Webface [17]. Полный список рассмотренных корпусов, а также их характеристики представлены в табл. 1.

## Сравнительный анализ методов распознания лиц людей в маске

После введения обязательного масочного режима в большинстве стран мира системы распознания лиц, разработанные в доковидную эру, столкнулись с новыми проблемами. Маска закрывает часть лица и препятствует дальнейшей классификации. Область носа очень важна в задаче распознавания лиц, так как она используется для нормализации лица и коррекции позы и поворота головы. Однако маска практически всегда закрывает нос, существенно усложняя задачу распознания лица. Для решения этих проблем необходимы новые модели и методы.

В работе [19] использован самый очевидный подход к распознанию лица в условиях частичного перекры-

*Таблица 1*. Корпусы изображений людей в защитных масках
*Table 1.* Masked face datasets

| Корпус | Количество изображений | Количество людей | Количество типов масок | Способ наложения масок |
|---|---|---|---|---|
| RMFRD [5] | 95 000 | 525 | 1 | Реальный |
| SMFRD [5] | 500 000 | 10 000 | 1 | Синтетический |
| MFSR [6] | 11 615 | 1004 | 1 | Реальный/синтетический |
| LFW-SM [11] | 13 233 | 5749 | 4 | Синтетический |
| MFR2 [11] | 269 | 53 | 5 | Синтетический |
| MFV [14] | 400 | 200 | 1 | Синтетический |
| MFI [14] | 4916 | 669 | 1 | Синтетический |
| MFD [5] | 990 | 45 | 5 | Синтетический |
| MFW-mini [18] | 3000 | 300 | 14 | Синтетический |
| SFOD [8] | 30 000 | 307 | 40 | Синтетический |
| MSIMV2-Masked [9] | 5,8 млн | 85 000 | 1 | Синтетический |
| CASIA NIR-VIS 2.0 [16] | 17 580 | 725 | 5 | Синтетический |

тия — извлечено максимальное количество признаков из областей лица, не закрытых маской, игнорируя остальные. Применены предварительно обученные сверточные нейронные сети (Convolutional Neural Network, CNN). В основном из исходных изображений использованы только области глаз и лба. Затем для квантования представления на последнем сверточном слое применен алгоритм «мешок признаков» (bag-of-features) для обучения, тестирования и валидации использован корпус данных RMFRD. В [20] также применен корпус RMFRD, каскад Хаара и нейронная сеть MobileNet для обнаружения графического региона маски и дальнейшего его удаления. Для классификации оставшейся области лица использованы нейросети VGG16 и Triplet Loss FaceNet в многопоточном режиме.

В [21] представлена модель глубокого обучения, основанная на функции ArcFace. Изменения внесены в функции извлечения признаков и потерь. Из исходного корпуса данных распознавания лиц сгенерирована версия с масками, а для классификации применена модель ResNet-50. В итоге получена комбинированная модель, состоящая из модифицированной функции ArcFace и нейросети ResNet-50. Данный метод назван мультизадачным ArcFace (Multi-Task ArcFace). В результате ресурсозатратность конечной модели оказалась приемлемой, что достигнуто за счет использования облегченной версии ResNet-50.

В работе [22] разработана сеть FaceMaskNet-21, обученная с помощью 4-мерных кортежей с глубоким метрическим обучением. В сети использованы 128-мерные кодировки, сгенерированные для каждого лица в корпусе данных, а для распознания — признаки, доступные в открытых частях лица, глаз, лба и контура лица. Применены Histogram of Oriented Gradients (HOG) функции для более активного распознания и корпусы данных: RMFRD, MFDD и SMFRD.

В [11] предложен программный инструментарий MaskTheFace для генерации синтетических корпусов изображений лиц в масках. Инструментарий использует ориентиры на лицах, чтобы определить ключевые особенности и наклон лица для дальнейшего наложения маски. Создана модель MaskTheFace для распознавания лиц в маске с помощью системы FaceNet, создающей эмбэддинги лиц. Для обучения FaceNet использованы изображения лица из корпуса VGGFace2 и 42 случайно сгенерированных изображения этого лица в различных масках. Полученный корпус назван VGGFace2-mini-SM и является достаточно разнообразным, а маски, наложенные синтетическим образом, хорошо совпадают с лицом. Однако точность распознания лиц с помощью модели MaskTheFace составляет 86 %, что является не самым высоким показателем.

CNN использованы в работе [20], где предложена конфигурация многозадачной каскадной сверточной нейронной сети (MTCNN) для обнаружения частей лица, не закрытых маской. Соответствующие части лица после некоторой предобработки проанализированы моделью FaceNet, которая необходима для вычисления высокоуровневых признаков. Высокоуровневые признаки классифицированы с помощью метода опорных векторов (Support Vector Machine, SVM) для получения конечного результата идентификации личности. Данная система использована в двух сценариях. В первом случае в качестве входных данных для обучения применены лица без масок, а для тестирования — в масках, во втором — оба варианта изображений лиц при обучении и тестировании.

Кроме корпусов MFR, MFV и MFI в работе [13] предложен метод триангуляции, применяемый для разделения изображений на маленькие треугольники. Каждому треугольнику изображения лица соответствует треугольник изображения маски. Такой подход применен для создания искусственных корпусов изображений лиц в масках. Для распознавания лиц предложена модель обнаружения скрытых частей Latent Part Detection, которая основана на предположении, что человек при распознавании лица анализирует видимые скрытые части лица, закрытые маской. Однако факт того, что маска всегда отражает признаки лица, скрытого под ней, справедлив не для всех типов масок.

Есть сомнения, что предложенный метод достаточно универсален для всех средств индивидуальной защиты.

Одним из способов решения проблемы перекрытия части лица при его распознании может быть автоматическое дополнение его открытой части. В [7] использован этот принцип и предложен метод автоматического удаления объектов с лица и синтеза поврежденных областей с сохранением исходной структуры. Авторы сохранили структурное и форменное постоянство полученного лица с использованием двух дискриминаторов, обученных для восстановления строения закрытой области. Для этой задачи использован синтетический корпус данных на основе CelebA, так как не было возможности применить реальные данные из-за отсутствия пары изображений людей в масках и без нее в открытом доступе. Полученная объединенная модель с прямой связью производит структурно правдоподобные изображения лиц. Исследователи провели тестирование своего метода восстановления в связке с четырьмя современными моделями распознания лиц: VGGFace, FaceNet, OpenFace и DeepFace. Полученные системы продемонстрировали высокую точностью в задаче распознания лиц в масках.

В [20] представлен метод дополнения области маски. Разработанная система улучшает разрешение изображений с помощью расширенной свертки и уменьшает потерю информации с помощью механизма внимания (attention). Для распознания дополненных лиц использована модель ResNet, для обучения — корпусы RMFRD и SMFRD.

В работе [23] представлена схема для распознания лиц в масках, основанная на деокклюзионной дистилляции (Deoclussion Distillation). Окклюзиями здесь называются маски, закрывающие часть лица, а деокклюзией — процесс отделения маски. Разработанная система включает два модуля: модуль деокклюзии, состоящий из генеративно-состязательной сети (GAN), которая служит для дополнения закрытой части изображения лица и модуля, выполняющего дистилляцию. Предварительно обученная модель распознавания лиц адаптирует свои знания о лицах с помощью дистилляции знаний модели VGGFace2. Дополнительно была обучена разработанная модель для классификации маски на три класса: простые, сложные и гибридные.

Одним из применений систем идентификации лиц в масках — выявление преступников в публичных местах, такой сценарий рассмотрен, например в работе [24], где представлен метод повторной идентификации пешеходов ReID. Данный метод заключается в попытке найти связи между изображениями в маске и без маски одного и того же человека. Метод повторно извлекает локальные и глобальные признаки лица в маске и измеряет сходство между исходным и всеми изображениями из определенной базы данных. При нахождении совпадения производится идентификация с помощью нейросети FaceNet. Сопоставление рассмотренных методов, а также оценки их эффективности представлены в табл. 2.

*Таблица 2*. Сопоставление методов распознания лиц в масках

*Table 2.* Masked face recognition methods comparison

| Работа | Модель распознавания | Корпус данных | Показатель эффективности | Значение |
|---|---|---|---|---|
| Din et al. [7] (2020) | GAN | CelebA | Fréchet inception distance | 6,102 баллов |
| Yalavarth et al. [19] (2020) | CNN | RMFRD | Positive Predictive Value | 60,17 баллов |
| Montero et al. [21] (2021) | MTArcFace | LFW, CFP, Agedb | Точность распознавания | 99,78 % |
| Hariri et al. [19] (2021) | VGG-16, AlexNet, ResNet-50 | RMFRD, SMFRD | Точность распознавания | 91,30 % |
| Maharani et al. [20] (2020) | VGG-16 И FaceNet | Собственный корпус | Точность распознавания | 100 % |
| Boutros et al. [10] (2021) | ResNet-50, MobileFaceNet | MSIMV2, MFR, MRF2 | Equal Error Rate (EER) | 7,82 баллов |
| Golwalkar et al. [22] (2020) | Face MaskNet-21 | Собственный корпус | Точность распознавания | 88,92 % |
| Hong et al. [24] (2020) | Сеть с механизмом внимания (Attention-based) | MFDD, RMFRD | Точность распознавания | 95,05 % |
| Anwar et al. [11] (2020) | MaskThe Face | VGGFace2-mini-SM, LFW-SM | Точность распознавания | 97,25 % |
| Mandal et al. [25] (2021) | ResNet-50 | RMFRD | Точность распознавания | 87,00 % |
| Ejaz et al. [20] (2019) | MTCNN | MFD | Точность распознавания | 98,50 % |
| Deng et al. [16] (2021) | GAN | MFSR, CASIA-WebFace, VGGFace2 | Точность распознавания | 86,50 % |
| Li et al. [23] (2020) | GANS | Celeb-A, LFW, AR | Точность распознавания | 95,44 % |
| Ding et al. [14] (2020) | Two-branch CNN | MFV, MFI, LFW | Точность распознавания (Rank3) | 93,70 % |
| Du et al. [26] (2021) | Siamese сети | Oulu-CASIA NIR-VIS, BUAA-VisNir | Точность распознавания (Rank1) | 98,60 % |
| Wu et al. [27] (2021) | ResNet | RMFRD, SMFRD | Точность распознавания | 95,00 % |
| Li Y et al. [28] (2021) | CBAM | Webface, AR, Yela B, LFW | Точность распознавания | 92,61 % |

### Системы распознания людей в индивидуальной защите по голосу

Устная речь — самый естественный способ общения между людьми. Помимо смысла произнесенных слов, речевой сигнал передает паралингвистическую информацию о личности говорящего, его характеристиках и эмоциональном состоянии, акустической среде, языке, акценте и т. д. Судебно-криминалистический анализ речи и голоса диктора позволяет выявлять правонарушителей, используя записи с места преступления. Однако современные системы идентификации личности по голосу сталкиваются с трудностями при обработке синтезированного, модифицированного, подделанного или естественно измененного сигнала.

Для сокрытия личности преступники стали часто использовать медицинские маски [29]. Ношение маски влияет на произносимую речь как активным, так и пассивным образом. Большинство средств индивидуальной защиты характеризуются звукопоглощающими свойствами, а также затрагивают механизмы речевой артикуляции. В зависимости от типа маски, степени ее контакта и соприкосновения с лицом, маска ограничивает артикуляторные движения в разной степени. Эти ограничения изменяют нормальную артикуляцию некоторых согласных звуков, например, /п/ и /м/.

Влияние маски на идентификацию собеседника исследовано в работе [30], где изучены некоторые способы изменения голоса, в том числе и медицинские маски. Представлена идентификация человека по голосу с помощью системы FASRS, и изучены идентификационные баллы для каждого члена группы целевых дикторов. В результате сделан вывод, что ношение хирургической маски неблагоприятно влияет на распознавание лица.

В работе [31] предпринята попытка измерить влияние масок на частотные характеристики речи. Потери при передаче аудиосигнала измерялись путем воспроизведения речи через громкоговоритель и дальнейшей его записи с помощью микрофона, отделенного от динамика лицевой маской. Потери в передаче мощности аудиосигналов в различных диапазонах слышимых частот измерены для 44 масок из различных тканых материалов. Получен очевидный результат, что потери передачи зависят от веса, толщины и плотности/пористости ткани. Также замечено, что поглощение звуковой энергии в разных тканях приводит к большим потерям энергии в высокочастотных диапазонах, чем в низкочастотных.

Для исследования и решения проблем распознания личности по голосу необходимы обширные речевые базы данных.

### Корпусы аудиоданных для распознавания личности в маске

В [30] представлен корпус речевых данных в условиях перекрытия лица диктора различными объектами (Speaking Under Face Cover Corpus, SUFCC). Данная база данных создана для автоматического распознавания личности говорящего. При записи использованы четыре типа одежды на лице, которые люди чаще всего носят в общественных местах: мотоциклетный шлем, резиновая маска, медицинская маска, шарф.

Записи сделаны в звукоизолированной комнате площадью около 5 м$^2$ с двумя окнами и двойными дверями. Данные изначально записаны с частотой 44,1 кГц, в 16-битном формате моно. Запись велась одновременно с трех микрофонов: гарнитуры, размещенной возле рта говорящего (AKG C444), микрофона (AKG C4000B), прикрепленного к стене с правой стороны динамика, микрофона (AKG C4000B), расположенного за динамиком. Для записи каждый участник произносил заранее подготовленный, фиксированный текст, и некоторый отрывок спонтанной речи. Данные действия записаны для всех типов масок в течение двух сеансов. В эксперименте приняли участие люди в возрасте от 21 до 28 лет. Каждая запись длилась от 60 до 90 с. Контрольная запись без маски записана без усиления аудиосигнала. Речевая база данных включает записи 4 мужчин и 4 женщин, всего 60 аудиофайлов общей длительностью 1,5 ч для каждого из 8 участников. Типы масок, используемых в исследовании, представлены на рис. 1.

Исследование влияния масок на качество распознания личности говорящего рассмотрено в работе [32]. Создан корпус аудиоданных OWR Audio Face Covering Corpus (OWR-AFCC), состоящий из образцов короткой речи 8 участников (6 мужчин и 2 женщин). Записи произведены на личные смартфоны участников: без масок, с тканевым покрытием лица и медицинской маской. Эксперимент выполнен в две сессии: в помещении и на улице.

Audio-Visual Face Cover Corpus (AVFCC) [33] — один из самых представительных корпусов для рас-

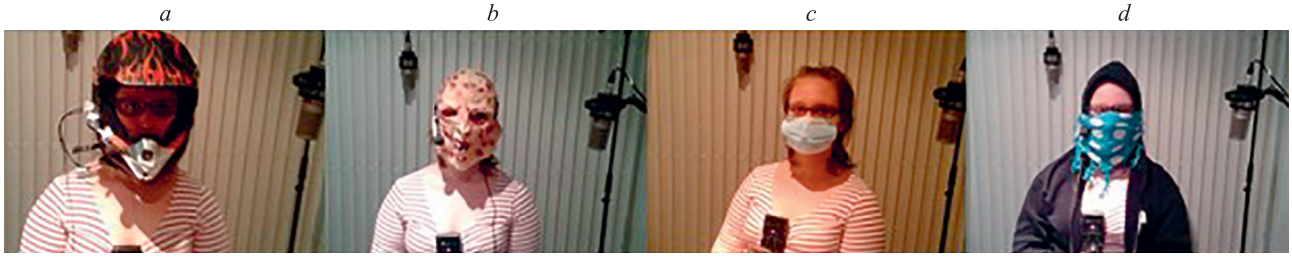



*Рис. 1.* Типы масок, используемые в исследовании [30]: мотоциклетный шлем (*a*); резиновая маска (*b*); медицинская маска (*c*); шарф (*d*)

*Fig 1.* Types of masks used in research [30]: motorcycle helmet (*a*), rubber mask (*b*), surgery mask (*c*), scarf (*d*)

познания людей по голосу в средствах индивидуальной защиты. Состоит из высококачественных аудио- и видеозаписей 10 носителей британского английского языка в различных типах лицевых масок. Участники эксперимента произносили вслух корпус из 64 /C1VC2/ слогов (трехбуквенное слово, состоящее из согласной, за которой следует гласная, а затем еще одна согласная), встроенных в несущую фразу. Список слов был повторен 1 + 8 раз: 1 раз в контрольном состоянии и 8 раз в различных видах масок. Аудиозаписи производились с помощью аудиогарнитуры и двух микрофонов, расположенных перед говорящим и позади него. Таким образом, всего на каждое устройство записано 6120 высказываний. Этот корпус создан как для смежных областей исследований голосовых характеристик, так и для тематических исследований, каким и является идентификация людей по голосу.

В 2020 году на международных соревнованиях по компьютерной паралингвистике ComParE-2020 в рамках конференции INTERSPEECH был представлен корпус аудиоданных Mask Augsburg Speech Corpus (MASC) [34]. Корпус предназначен для задачи детектирования наличия маски на лице человека посредством анализа речи. В данном корпусе также идентифицированы сессии для каждого субъекта — участника эксперимента, что позволяет его использовать и для задачи распознания людей по голосу. В эксперименте приняли участие 16 женщин и 16 мужчин, являющихся носителями немецкого языка (средний возраст участников — 25 лет). Записи сделаны с использованием конденсаторного микрофона AKG C4500 BC, исходные данные имели частоту дискретизации 48 кГц, а в дальнейшем были сжаты до 16 кГц. Аудиофайлы разделены на одинаковые короткие фрагменты речи продолжительностью в 1 с.

Собственный речевой корпус Mask Sorbonne Speech Corpus (MSSC) [34] собран одной из команд-участников соревнований ComParE 2020 для расширения обучающих данных корпуса MASC. Для имитации человеческого голоса использована акустическая система — Bose Sound-Link micro. Процесс записи корпуса проходил в два этапа: сначала с помощью динамика проигрывались 1000 высказываний от 30 информантов (15 мужчин и 15 женщин), которые выбраны из речевого корпуса German Distant Speech Data Corpus [35]. Далее на колонку надевалась медицинская маска, и снова проигрывались эти же высказывания. В результате был создан синтетический корпус, содержащий высказывания людей в масках и без них.

Перечень рассмотренных корпусов для распознания людей в средствах индивидуальной защиты представлен в табл. 3. Наличие корпусов данных для распознания личности человека по характеристикам его голоса в маске позволяет проводить исследования и разработки для решения данной задачи.

### Сравнительный анализ методов распознавания личности людей в маске по голосу

В [30] кроме создания корпуса SUFCC разработана система идентификации человека по его голосу. Текстонезависимая идентификация говорящего стала актуальной задачей в последнее десятилетие. В работе [30] авторы предположили, что самое перспективное направление — подход на основе i-векторов. Архитектура разработанной системы представлена на рис. 2.

В результате использована готовая система RUN, успешно зарекомендовавшая себя в реальных криминалистических условиях. Схема предложенного в работе [30] метода извлечения признаков изображена на рис. 3.

Голосовой сигнал разделен на кадры длительностью 30 мс со сдвигом в 15 мс. Для кадрированного сигнала произведено линейное прогнозирование кратковременного спектра. Далее 19 мел-частотных кепстральных коэффициентов (MFCC) извлечены и дополнены энергиями кадра. Произведена RASTA фильтрация и расчет $\Delta$ и $\Delta\Delta$ характеристик. В результате сформированы векторы признаков из 60 компонентов. На последнем этапе

*Таблица 3*. Сравнение корпусов аудиоданных для распознавания людей в масках

*Table 3.* Comparison of datasets for masked speaker recognition

| Корпусы | Количество дикторов | Язык | Формат данных | Продолжительность, ч | Количество экземпляров в каждом классе |
|---|---|---|---|---|---|
| SUFCC [30] | 4 мужчины<br>4 женщины | Английский | 44,1 кГц, в 16-битный формат моно | Около 12 | 96 (речь в шлеме),<br>96 (речь в резиновой маске),<br>96 (речь в медицинской маске),<br>96 (речь в шарфе),<br>96 (речь без маски) |
| AVFCC [33] | 5 мужчин<br>5 женщин | Английский | 48,0 кГц, 768 кбит/с, 16-бит моно | Около 10 | 10 (контрольный),<br>10 × 8 (8 различных масок) |
| OWR-AFCC [32] | 16 мужчин<br>16 женщин | Немецкий | 16 кГц, 16-бит моно | Около 8 | 16 (в маске в помещении),<br>16 (без маски в помещении),<br>16 (без маски на улице) |
| MSSC [34] | 15 мужчин<br>15 женщин | Немецкий | 48,0 кГц, 16-бит моно | Нет данных | 1000 (речь без маски),<br>1000 (речь с маской) |
| BRAVE-MASKS [36] | 15 мужчин<br>15 женщин | Русский | 48,0 кГц, 16-бит моно | 60 | 83 (речь без маски),<br>83 (речь с маской) |

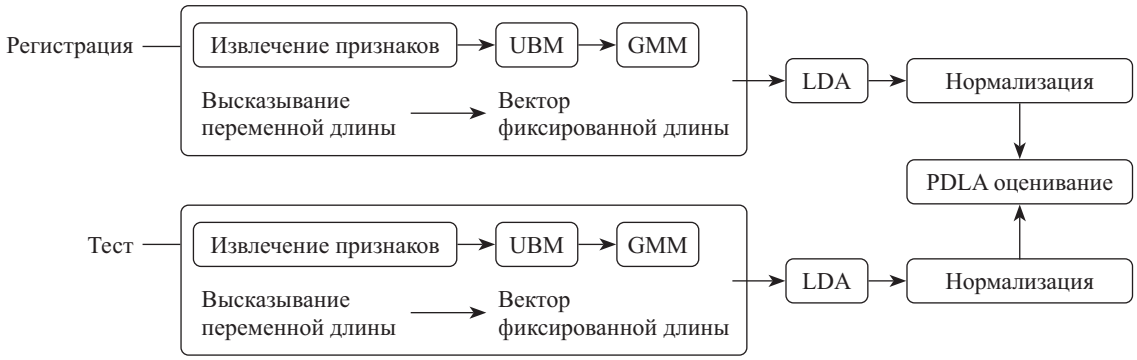



*Рис. 2*. Архитектура системы SUFCC [30]

GMM — Gaussian Mixture Model; UBM — Unified Background Model; LDA — Linear Discriminant Analysis

*Fig. 2*. SUFCC system architecture [30]

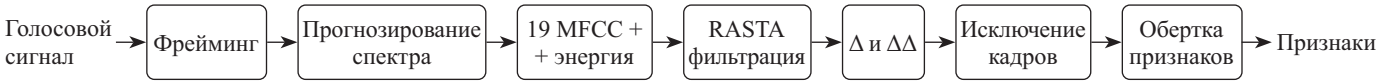



*Рис. 3*. Схема метода извлечения акустических признаков [30]

*Fig. 3*. Acoustic features extracting scheme [30]

на основе энергии уровня кадра применена функция обертки признаков. Гендерно-зависимая универсальная фоновая модель UBM с 2048 компонентами обучена с использованием корпуса NIST SRE 2004–2006 [37]. При постобработке i-векторов уровня высказывания для улучшения разделимости классов и уменьшения размерности i-векторов до 200 использована линейная проекция дискриминантного анализа LDA.

Результаты исследований системы идентификации говорящего при использовании различных масок представлены в табл. 4. Для оценки точности использован показатель:

$$\text{Accuracy} = \frac{\text{TP} + \text{TN}}{\text{TP} + \text{FP} + \text{TN} + \text{FN}},$$

где количества срабатываний: TP (True positive) — истинно положительные; TN (True Negative) — истинно отрицательные; FN (False Negative) — ложноотрицательные; FP (False Positive) — ложноположительные.

В столбцах данной таблицы показаны типы масок, использовавшихся в тестовом корпусе данных, а в строках таблицы расположены типы масок, использовавшихся при создании шаблона идентификации говорящего. В ячейке a_(i,j) показана точность (Accuracy, %), полученная при создании шаблона на корпусе i и тестировании на корпусе j. Сравнение выделенных диагональных элементов, находящихся по диагонали таблицы показывает, что при соответствии типа масок, использующихся при обучении и тестировании, система показывает высокие результаты точности. Производительность распознавания снижается, когда в обучающем шаблоне и тестовом сегменте взяты разные маски. Однако даже при таких комбинациях в ситуации, когда шаблон создан без маски, а запись голоса произведена в маске, система показала точность равную 94,2 %. В работе [30] авторами не предложено принципиально нового подхода к распознанию людей в масках по голосу, выполнена только адаптация ранее разработанного метода путем настройки гиперпараметров, и получены высокие показатели эффективности.

В [32] проведен анализ существующих методов распознавания по голосу в условиях, когда лицо говорящего закрыто различными типами масок. Авторами собран корпус данных OWR-AFCC, он содержит телефонные записи образцов речи. 8 участников (6 мужчин и 2 женщины): контрольная запись, запись с тканевой и медицинской масками. Помимо созданного корпу-

*Таблица 4*. Показатели точности системы SUFCC [30], %

*Table 4.* Accuracy values of SUFCC evaluation [30], %

| Типы масок при создании шаблона идентификации говорящего | Типы масок тестового корпуса данных | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | Без маски | Шлем | Резиновая маска | Медицинская маска | Капюшон + шарф |
| Без маски | 95,2 | 94,9 | 88,6 | 94,2 | 93,3 |
| Шлем | 88,5 | 97,7 | 86,0 | 88,8 | 88,4 |
| Резиновая маска | 90,3 | 96,5 | 97,1 | 94,1 | 91,4 |
| Медицинская маска | 95,1 | 96,7 | 90,1 | 97,9 | 95,6 |
| Капюшон + шарф | 90,3 | 85,7 | 82,5 | 94,9 | 97,0 |

са OWR-AFCC для тестирования также использованы аудиоречевые данные из корпуса Native Forensics Audio-Visual Face Cover Corpus (NF-AVFCC). Все тестовые данные объединены в один корпус. Для оценивания эффективности работы системы использован количественный показатель средней равновероятной ошибки:

$$EER = \frac{FAR + FRR}{2},$$

где отношения количества: FAR (False Acceptance Rate) — ложноположительных и FRR (False Rejection Rate) — ложноотрицательных срабатываний к количеству всех срабатываний.

Нулевые значения ошибки EER наблюдались для всех экспериментов на корпусе OWR-AFCC. У тех же участников при наличии тканевой маски оценки ниже, но этого не хватило, чтобы внести ошибки. В ходе экспериментов с маской и без результаты аналогичны. Показатели метрики EER для корпуса NF-AVFCC различались для разных типов масок. Для медицинской маски и шарфов значения EER составили 0 %, для мотоциклетного шлема получена деградация эффективности, при этом EER — 4,00 %. EER для заклеенного лентой рта равен 14,67 %, что является наихудшим показателем. Эксперименты показали, что повседневные предметы одежды и медицинские маски не оказывают негативного воздействия на распознание говорящего с помощью x-векторного анализа.

Можно сделать вывод, что на данный момент наблюдается недостаток исследований по голосовому распознанию личности человека в масках. Однако рассмотренные исследования однозначно подтверждают применимость существующих методов к решению данной задачи, что позволяет сделать предположение о незначительном ухудшении производительности существующих методов при анализе голосовых данных субъектов в маске.

### Системы бимодального распознания личности людей

В некоторых реальных задачах недостаточно признаков, которые можно извлечь из изображений лица или речи. Такой задачей является и рассматриваемое в настоящей работе распознавание людей в масках. Для достижения лучших результатов классификации возможно использование объединения информации от двух взаимодополняющих модальностей. Аудиовизуальные биометрические методы используют множество подходов объединения для взаимного дополнения аудио- и видеохарактеристик двух модальностей. Классификация методов объединения представлена на рис. 4.

Методы объединения делятся на три типа: предварительное (Early Fusion), промежуточное (Intermediate Fusion) и позднее (Late Fusion). Рассмотрим различные аудиовизуальные биометрические методы согласно классификации и их показатели эффективности.

### Методы раннего объединения

Матрица Лапласа — эффективный метод представления аудио- и видеопризнаков для раннего объединения информации. Метод карт собственных значений лапласиана (Laplacian Eigenmaps) — нелинейный подход к снижению размерности данных, который позволяет сохранить внутренние геометрические взаимосвязи и локальную структуру данных. Данный метод использован в работе [38]. В предложенном подходе фрагменты изображений лиц и MFCC, извлеченные из записей голоса спроецированы на пространство карт собственных значений лапласиана и в дальнейшем объединены в единый вектор признаков для классификации. В ходе экспериментов была достигнута большая точность по сравнению с объединением с помощью линейного дискриминантного анализа (Linear Discriminant Analysis, LDA), а также по сравнению с использованием признаков каждой из модальностей по отдельности.

Многоканальный полуавтоматический дискриминантный анализ (Multi-level Semi-Supervised Discriminant Analysis, MSDA) — расширение полуавтоматического дискриминантного анализа (Semi-supervised Discriminant Analysis, SDA) для осуществления объединения информации на уровне признаков [39]. MSDA основан на методе обучения с полуавтоматическим управлением с несколькими представлениями. Он накладывает локальное ограничение смежности нескольких представлений на целевую функцию традиционного LDA. Ограничение требует, чтобы два соседних образца в первоначальном пространстве признаков первого представления располагались близко друг к другу в конечном пространстве меньшей размерности другого представления. Этот подход лучше использует информацию, полученную из небольших, вручную размеченных корпусов для обучения, и поэтому превосходит традиционный LDA.

В работе [40] для объединения на уровне признаков использованы изображения губ и кривые огибающей спектра речевого сигнала. Извлеченные признаки преобразованы в векторы временных рядов и объединены для дальнейшей обработки. Авторы предложили метод получения расстояния между данными из различных векторов временных рядов, названный динамическим выравниванием времени (Dynamic Time Wrapping, DTW). С помощью DTW в предложенном подходе рассчитано сходство между признаками голоса и черт лица. Векторы сходства далее использованы для классификации.

В методе, предложенном в работе [41], записи голоса и изображения лица отдельно обработаны совместной машиной Больцмана (joint-training Deep Boltzman Machine, jDBM) и ограниченной совместной машиной Больцмана (joint-training Restricted Boltzman Machine, jRBM). Входные данные были зашумлены с помощью JPEG-сжатия и добавления случайных звуков множества голосов. В результате авторы сделали вывод, что данный бимодальный метод показывает лучшие результаты в условиях ухудшения качества входных данных.

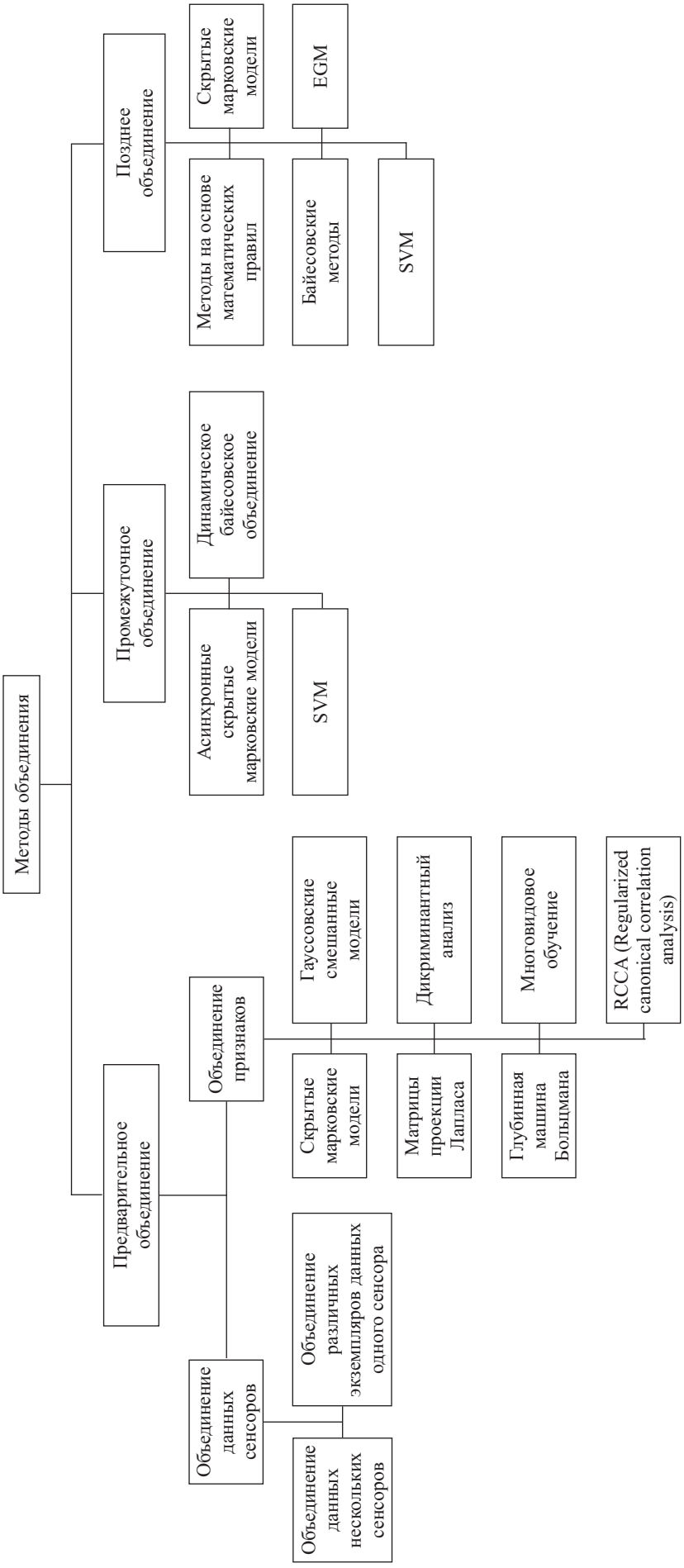



*Рис. 4.* Классификация методов объединения аудиовизуальной информации
*Fig. 4.* Audiovisual fusion methods classification

Еще один эффективный метод объединения был предложен в работе [42], где разработан подход, основанный на объединении MFCC и гистограммы направленных градиентов с помощью дискриминантного корреляционного анализа (Discriminant Correlation Analysis, DCA). В ходе экспериментов для классификации вектора объединенных признаков были использованы следующие методы: SVM, LDA, SDA, случайный лес, K-Nearest Neighbors и SVM. Среди протестированных классификаторов наилучшую производительность показал случайный лес, а наихудшую — метод опорных векторов.

### Методы промежуточного объединения

Промежуточное объединение информации — более сложный метод по сравнению с ранним объединением. Методы, использующие промежуточное объединение, должны обрабатывать информационные потоки различных модальностей при отображении из пространства признаков в пространство решений. Для промежуточного объединения часто используется временная синхронизация между потоками информации, с помощью которой можно избежать проклятья размерности пространства признаков, возникающего в методах раннего объединения. Примерами моделей, используемых для промежуточного объединения, являются скрытые марковские модели (Hidden Markov Models, HMM), которые могут обрабатывать несколько потоков данных параллельно.

Промежуточное объединение с использованием асинхронных HMM (AHMM) для осуществления текстонезависимой мультимодальной аутентификации описано в работе [43]. Обучение AHMM выполнено с помощью алгоритма максимизации ожидания (Expectation Maximization, EM) на чистых данных. Эксперименты проведены на аудиовизуальных данных с различным уровнем шума (0,5 и 10 дБ). В результате экспериментов значение показателя ошибок EER оказалось в два раза меньше по сравнению с моделью, использующей одну модальность.

В работе [44] рассмотрен подход, названный авторами байесовской аудиовизуальной идентификацией говорящего (Bayessian audio-visual speaker authentication). Для распознавания личности по записи голоса использованы сдвоенные скрытые марковские модели (Coupled HMM, CHMM), а для распознавания личности по изображению — скрытые марковские модели (Enhanced HMM, EHMM). Разработанная модель в качестве входных данных принимает видеофрагменты. На первом этапе происходит разделение аудио- и видеосигналов, а также выделение на отдельных изображениях области лица и губ говорящего. Изображения лица в дальнейшем находят применение для вычисления оценки схожести с предоставляемыми шаблонами с помощью EHMM, а изображения губ совместно с фрагментами записи голоса подаются на CHMM для вычисления оценки схожести по второй модальности. На последнем этапе оценки объединяются по следующему правилу [44]:

$$L(\mathbf{O}^f, \mathbf{O}^a, \mathbf{O}^v|k) = \lambda_f L(\mathbf{O}^f|k) + \lambda_{av} L(\mathbf{O}^a, \mathbf{O}^v|k),$$

где $\mathbf{O}^f$, $\mathbf{O}^a$, $\mathbf{O}^v$ — последовательности данных записей голоса, изображений губ и изображений лица соответственно; $L(*|k)$ — оценка схожести с $k$-й личностью из базы данных; $\lambda_f$ и $\lambda_{av}$ — некоторые веса, полученные в ходе обучения.

Эксперименты проведены на корпусе данных XM2VTS, использование двух модальностей уменьшило количество ошибок на 15 % и 13 % при различных уровнях Гауссова шума соответственно.

### Методы позднего объединения

Методы позднего объединения осуществляют объединение результатов, полученных индивидуально от различных классификаторов аудио- и видеомодальностей. Существует большое количество различных подходов к позднему объединению. Простой и распространенный подход — сочетание результатов аудио- и видеомоделей с использованием различных математических правил. Правила взвешенной суммы и взвешенного произведения применяются к модальностям распознавания лиц и голоса отдельно в работе [45]. Эксперименты показали, что производительность мультимодальный системы с поздним объединением на основе взвешенной суммы увеличилась по сравнению с одномодальной системой (значение EER уменьшилось на 14 %) [45].

Объединение с помощью взвешенного суммирования также применено в [46]. Для распознания диктора по голосу использована модель гауссовских смесей (Gaussian Mixture Model, GMM) совместно с универсальной фоновой моделью (Unified Background Model, UBM). Для распознания лиц предложен алгоритм Local Binary Pattern (LBP). Вероятностная оценка по GMM-UBM и метрика взвешенного расстояния на LBP объединены на уровне оценок с помощью взвешенной суммы. Исследователи достигли значения EER, равного 22,7 % при распознавании мужчин и 19,3 % — женщин, что в среднем на 10 % меньше, чем при использовании одной модальности.

В [47] для объединения результатов двух моделей GMM и HMM использована сеть Байеса. Метод байесовского объединения выбирает изображения и аудиоданные из каждой сессии на основе оценок достоверности (confidence scores). Эксперименты показали высокие результаты производительности модели, точность классификации составляет 99,5 % ± 0,3 %.

В работе [48] применено позднее объединение на уровне вероятностных оценок. Для распознавания лиц задействованы четыре варианта моделей CNN: ResNet-50, PyramidNet, ArcFace-50, ArcFace-100. Для распознавания голоса использован метод на основе x-векторного анализа. Конечный результат распознавания личности вычислен с помощью объединения результатов двух моделей на уровне выдаваемых ими оценок (score fusion). Выходными данными моделей каждой из модальностей являются три скалярные величины оценок: $s$ — верификации, $q_e$ — качества шаб-

*Таблица 5*. Сравнение бимодальных методов распознавания личности
*Table 5.* Bimodal person recognition methods comparison

| Работа | Аудио-признаки | Визуальные признаки | Классификатор | Метод объединения | База данных | Показатель эффективности, % |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Alam et al. [38] (2013) | MFCC | Признаки Хаара | Linear Regression + Gaussian Mixture Models + Universal Background Model | Объединение на уровне оценок | Austalk [49] | Accuracy: 31,3 |
| Khoury et al. [50] (2014) | MFCC | DCT-mod2 | Gaussian Mixture Models + Inter Session Variability + Total Variability | Объединение данных на уровне LLR-оценок | MOBIO [51] | EER: 6,32 |
| Alam et al. [52] (2013) | MFCC | Признаки Хаара | Linear Regression + Gaussian Mixture Models + Universal Background Model | Правило суммы | Austalk [49] | Accuracy: 100 |
| Tresadren et al. [53] (2013) | MFCC | LBP | Классификатор срезов с усилением | Quadratic Discriminant Analysis (QDA) | MOBIO [51] | EER: 0,5 |
| Islam et al. [54] (2014) | MFCC | ASM | HMM | Back-Propagation Neural Network (BPN) | Собственная | Total Error Rate: 0 |
| Primorac et al. [55] (2016) | MFCC | Признаки Хаара | Joint sparse-классификатор | Объединение на уровне признаков | MOBIO [51] | Accuracy: 94,2 |
| Memon et al. [56] (2017) | MFCC | SVM | Матрица подобия MFCC признаков и оценок SVM | Объединение на уровне признаков | Собственная | Accuracy: 73,8 |
| Gofman et al. [42] (2018) | MFCC | HOG | SVM | Объединение на уровне признаков | CSUF-SG5 [57] | EER: 20,59 |
| Antipov et al. [48] (2019) | MFCC | 4 эмбэдинга лиц, извлеченные с помощью 4-х вариаций CNN | Логистическая регрессия (Logistic regression – LogR) | Объединение на уровне оценок | NIST SRE19 [58] | EER: 0,6 |
| Chenxi et al. [59] (2012) | MFCC | Признаки пирамидального фильтра Габора | Probabilistic Neural Network | Объединение на уровне признаков | Собственная | Accuracy: 100 |
| Shi et al. [40] (2012) | MFCC | LBP | DTW | Правило суммы | Собственная | Total Error Rate: 0 |
| Shen et al. [52] (2010) | MFCC | LBP | Gaussian Mixture Models + Universal Background Model + Local Binary Pattern | Объединение на уровне оценок | MOBIO [51] | EER: 21 |

лона, $q_t$ — качества тестового образца. Таким образом, объединение происходит по следующему правилу:

$$LLR_{spk+face} = \sum_{i \in \{spk,face\}} a_i s_i + b_i q_{ei} + c_i q_{ti} + d,$$

где $a_i$, $b_i$, $c_i$, $d$ — веса, полученные в ходе обучения. Результаты показали, что объединение на уровне баллов дает лучшую производительность на всех тестовых корпусах данных.

Сравнение всех рассмотренных методов аудиовизуального распознавания личности представлено в табл. 5.

**Заключение**

Распространение ношения масок существенно изменило область биометрических технологий. Рассмотрены результаты исследований, подтверждающих наличие новых проблем, с которыми столкнулись системы распознавания личности. Актуальность темы распознавания людей в средствах индивидуальной защиты подтверждается большим количеством новых исследований, призванных решить эту проблему.

В работе выполнен анализ основных корпусов данных аудио- и видеоинформации, содержащих изображения лиц и фонограммы голоса людей в масках.

На текущий момент наблюдается недостаток в обоих типах данных для создания автоматических систем. Представительных корпусов реальных изображений людей в масках очень мало, в открытом доступе находятся только два корпуса данных — RMFRD и MFSR. В условиях недостатка изображений предпринимаются попытки синтетического наложения масок на реальные изображения лиц. Однако данный тип корпусов не является универсальным для всех методов распознания лиц, так как синтезированные маски не всегда сохраняют необходимые признаки перекрываемой части лица. Для голосовых данных наблюдаются те же проблемы, в открытом доступе находятся всего 5 корпусов записей голоса общей продолжительностью порядка 60 ч.

Проведен сравнительный анализ современных методов распознания лиц в масках. Данная область хорошо исследована, существует большое количество разработанных систем. Исследованные системы демонстрируют высокую эффективность. Наилучшие показатели точности распознавания лиц 91,30 % и 95,05 % получены на корпусах RMFRD и MFDD. Однако дефицит данных усложняет оценку их производительности. Наблюдается недостаток исследований методов идентификации людей по голосу в масках, при этом выводы исследователей единогласно подтверждают снижение производительности существующих методов в новых условиях.

Сравнительный анализ бимодальных методов аудиовизуального распознавания личности без масок показал, что на данный момент исследования решения задачи распознавания людей в индивидуальной защите не найдены. Результаты анализа подтверждают применимость данных методов для задач, в которых наблюдается неполнота информации от каждой модальности. Это позволяет сделать предположение о применимости бимодальных методов к задаче распознавания людей в индивидуальной защите.

Согласно проанализированным работам, наибольшую эффективность для распознавания лиц в масках продемонстрировали вариации CNN, VGG-16 и FaceNet обеспечили точность распознавания до 100 % на собственном закрытом корпусе данных. Мультизадачная сеть MTCNN продемонстрировала точность распознавания лиц в 98,5 %, а сиамская вариация CNN показала 98,6 %. Большинство рассмотренных методов разработаны для распознавания личности только в медицинской маске, так как в современных условиях медицинская маска — самый распространенный предмет, носимый на лице. Однако, помимо медицинской маски, возможно ношение других средств индивидуальной защиты и предметов одежды. Актуальным направлением дальнейших исследований является расширение области применения текущих методов для случаев ношения всех возможных предметов, перекрывающих лицо. Перспективными направлениями развития существующих методов в области распознания лиц в маске является усовершенствование CNN и создание реальных баз данных изображений людей в масках.

В задаче распознавания личности по голосу методы i-векторного анализа показали незначительную деградацию точности при использовании маски. Данные методы совместно с CNN представляются наиболее перспективными для дальнейших исследований и создания бимодальных систем распознавания личности людей в медицинских масках.

На основе проведенных анализов сформулированы следующие требования, предъявляемые к перспективным системам распознавания людей в масках.

1. Высокая точность распознавания. Биометрические системы распознавания личности используются, в том числе для обеспечения безопасности людей, предоставления доступа к защищенным ресурсам, а также в криминалистической экспертизе. Для данных областей критически важно отсутствие ошибок. Важным направлением является проверка эффективности систем на реальных данных в натурных условиях, а не синтетических.
2. Одновременное использование аудио- и видеомодальностей. Система распознавания личности должна сохранять надежность работы при частичном отсутствии (неполноте) входных данных. Бимодальные системы способны преодолеть данные трудности за счет взаимного дополнения источников информации.
3. Робастность. Разработанные системы должны стабильно и надежно работать с различными типами входных данных и с данными различной степени качества. Изображения и записи голоса могут производиться в различных окружающих условиях, ракурсах, при динамическом освещении и акустической обстановке, так как запись может производиться как с близкого расстояния камерой персонального мобильного устройства, так и дистанционно с помощью камеры видеонаблюдения.

**Литература**


1. Chernenkova A. Facial recognition technology in Russia: do the citizens of Russia accept it? / University of Twente. BMS Faculty Department of Communication Science University of Twente. 2021. 78 p.
2. Кухарев Г.А., Матвеев Ю.Н., Форчманьски П. Поиск людей по фотороботам: методы, системы и практические решения // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2015. Т. 15. № 4. С. 640–653. https://doi.org/10.17586/2226-1494-2015-15-4-640-653
3. Grother P., Ngan M. Face recognition vendor test (FRVT): NIST Interagency Report 8009 / US Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology. 2014. https://doi.org/10.6028/NIST.IR.8009


**References**


1. Chernenkova A. *Facial recognition technology in Russia: do the citizens of Russia accept it?* University of Twente. BMS Faculty Department of Communication Science University of Twente, 2021, 78 p.
2. Kukharev G.A., Matveev Yu.N., Forczmański P. People retrieval by means of composite pictures — methods, systems and practical decisions. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2015, vol. 15, no. 4, pp. 640–653. (in Russian). https://doi.org/10.17586/2226-1494-2015-15-4-640-653
3. Grother P., Ngan M. *Face recognition vendor test (FRVT)*. NIST Interagency Report 8009. US Department of Commerce, National

4. Двойникова А.А., Маркитантов М.В., Рюмина Е.В., Рюмин Д.А., Карпов А.А. Аналитический обзор аудиовизуальных систем для определения средств индивидуальной защиты на лице человека // Информатика и автоматизация. 2021. Т. 20. № 5. С. 1116–1152. https://doi.org/10.15622/20.5.5
5. Wang Z., Wang G., Huang B., Xiong Z., Hong Q., Wu H., Yi P., Jiang K., Wang N., Pei Y., Chen H., Miao Y., Huang Z., Liang J. Masked face recognition dataset and application // arXiv. 2020. arXiv:2003.09093.. https://doi.org/10.48550/arXiv.2003.09093
6. Geng M., Peng P., Huang Y., Tian Y. Masked face recognition with generative data augmentation and domain constrained ranking // Proc. of the 28th ACM International Conference on Multimedia. 2020. P. 2246–2254. https://doi.org/10.1145/3394171.3413723
7. Din N.U., Javed K., Bae S., Yi J. A novel GAN-based network for unmasking of masked face // IEEE Access. 2020. V. 8. P. 44276–44287. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2977386
8. Din N.U., Javed K., Bae S., Yi J. Effective removal of user-selected foreground object from facial images using a novel GAN-based network // IEEE Access. 2020. V. 8. P. 109648–109661. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3001649
9. Deng J., Guo J., Xue N., Zafeiriou S. ArcFace: Additive angular margin loss for deep face recognition // Proc. of the 32nd IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2019. P. 4685–4694. https://doi.org/10.1109/CVPR.2019.00482
10. Boutros F., Damer N., Kirchbuchner F., Kuijper A. Self-restrained triplet loss for accurate masked face recognition // Pattern Recognition. 2022. V. 124. P. 108473. https://doi.org/10.1016/j.patcog.2021.108473
11. Anwar A., Raychowdhury A. Masked face recognition for secure authentication // arXiv. 2020. arXiv:2008.11104. https://doi.org/10.48550/arXiv.2008.11104
12. Damer N., Grebe J.H., Chen C., Boutros F., Kirchbuchner F., Kuijper A. The effect of wearing a mask on face recognition performance: an exploratory study // Proc. of the 19th International Conference of the Biometrics Special Interest Group (BIOSIG). 2020. P. 9210999.
13. Huang G.B., Ramesh M., Berg T., Learned-Miller E. Labeled faces in the wild: A database for studying face recognition in unconstrained environments // Workshop on Faces in'RealLife'Images: Detection, Alignment, and Recognition. 2008.
14. Ding F., Peng P., Huang Y., Geng M., Tian Y. Masked face recognition with latent part detection // Proc. of the 28th ACM international Conference on Multimedia. 2020. P. 2281–2289. https://doi.org/10.1145/3394171.3413731
15. Li S., Yi D., Lei Z., Liao S. The CASIA NIR-VIS 2.0 face database // Proc. of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops. 2013. P. 348–353. https://doi.org/10.1109/CVPRW.2013.59
16. Deng H., Feng Z., Qian G., Lv X., Li H., Li G. MFCosface: a masked-face recognition algorithm based on large margin cosine loss // Applied Sciences. 2021. V. 11. N 16. P. 7310. https://doi.org/10.3390/app11167310
17. Yi D., Lei Z., Liao S., Li S.Z. Learning face representation from scratch // arXiv. 2014. arXiv:1411.7923. https://doi.org/10.48550/arXiv.1411.7923
18. Hong J.H., Kim H., Kim M., Nam G.P., Cho J., Ko H.-S., Kim I.-J. A 3D model-based approach for fitting masks to faces in the wild // Proc. of the IEEE International Conference on Image Processing (ICIP). 2021. P. 235–239. https://doi.org/10.1109/ICIP42928.2021.9506069
19. Hariri W. Efficient masked face recognition method during the COVID-19 pandemic // Signal, Image and Video Processing. 2022. V. 16. N 3. P. 605–612. https://doi.org/10.1007/s11760-021-02050-w
20. Maharani D.A., MacHbub C., Rusmin P.H., Yulianti L. Improving the capability of real-time face masked recognition using cosine distance // Proc. of the 6th International Conference on Interactive Digital Media (ICIDM). 2020. P. 9339677. https://doi.org/10.1109/ICIDM51048.2020.9339677
21. Montero D., Nieto M., Leskovsky P., Aginako N. Boosting masked face recognition with multi-task arcface // arXiv. 2021. arXiv:2104.09874. https://doi.org/10.48550/arXiv.2104.09874
22. Golwalkar R., Mehendale N. Masked Face Recognition Using Deep Metric Learning and FaceMaskNet21 // SSRN Electronic Journal. 2020. P. 3731223. http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3731223
23. Li C., Ge S., Zhang D., Li J. Look through masks: Towards masked face recognition with de-occlusion distillation // Proc. of the 28th Institute of Standards and Technology, 2014. https://doi.org/10.6028/NIST.IR.8009
4. Dvoynikova A., Markitantov M., Ryumina E., Ryumin D., Karpov A. Analytical review of audiovisual systems for determining personal protective equipment on a person's face. *Informatics and Automation*, 2021, vol. 20, no. 5, pp. 1116–1152. (in Russian). https://doi.org/10.15622/20.5.5
5. Wang Z., Wang G., Huang B., Xiong Z., Hong Q., Wu H., Yi P., Jiang K., Wang N., Pei Y., Chen H., Miao Y., Huang Z., Liang J. Masked face recognition dataset and application. *arXiv*, 2020, arXiv:2003.09093. https://doi.org/10.48550/arXiv.2003.09093
6. Geng M., Peng P., Huang Y., Tian Y. Masked face recognition with generative data augmentation and domain constrained ranking. *Proc. of the 28th ACM International Conference on Multimedia*, 2020, pp. 2246–2254. https://doi.org/10.1145/3394171.3413723
7. Din N.U., Javed K., Bae S., Yi J. A novel GAN-based network for unmasking of masked face. *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 44276–44287. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2977386
8. Din N.U., Javed K., Bae S., Yi J. Effective removal of user-selected foreground object from facial images using a novel GAN-based network. *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 109648–109661. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3001649
9. Deng J., Guo J., Xue N., Zafeiriou S. ArcFace: Additive angular margin loss for deep face recognition. *Proc. of the 32nd IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2019, pp. 4685–4694. https://doi.org/10.1109/CVPR.2019.00482
10. Boutros F., Damer N., Kirchbuchner F., Kuijper A. Self-restrained triplet loss for accurate masked face recognition. *Pattern Recognition*, 2022, vol. 124, pp. 108473. https://doi.org/10.1016/j.patcog.2021.108473
11. Anwar A., Raychowdhury A. Masked face recognition for secure authentication. *arXiv*, 2020, arXiv:2008.11104. https://doi.org/10.48550/arXiv.2008.11104
12. Damer N., Grebe J.H., Chen C., Boutros F., Kirchbuchner F., Kuijper A. The effect of wearing a mask on face recognition performance: an exploratory study. *Proc. of the 19th International Conference of the Biometrics Special Interest Group (BIOSIG)*, 2020, pp. 9210999.
13. Huang G.B., Ramesh M., Berg T., Learned-Miller E. Labeled faces in the wild: A database for studying face recognition in unconstrained environments. *Workshop on Faces in'RealLife'Images: Detection, Alignment, and Recognition*, 2008.
14. Ding F., Peng P., Huang Y., Geng M., Tian Y. Masked face recognition with latent part detection. *Proc. of the 28th ACM international Conference on Multimedia*, 2020, pp. 2281–2289. https://doi.org/10.1145/3394171.3413731
15. Li S., Yi D., Lei Z., Liao S. The CASIA NIR-VIS 2.0 face database. *Proc. of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops*, 2013, pp. 348–353. https://doi.org/10.1109/CVPRW.2013.59
16. Deng H., Feng Z., Qian G., Lv X., Li H., Li G. MFCosface: a masked-face recognition algorithm based on large margin cosine loss. *Applied Sciences*, 2021, vol. 11, no. 16, pp. 7310. https://doi.org/10.3390/app11167310
17. Yi D., Lei Z., Liao S., Li S.Z. Learning face representation from scratch. *arXiv*, 2014, arXiv:1411.7923. https://doi.org/10.48550/arXiv.1411.7923
18. Hong J.H., Kim H., Kim M., Nam G.P., Cho J., Ko H.-S., Kim I.-J. A 3D model-based approach for fitting masks to faces in the wild. *Proc. of the IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, 2021, pp. 235–239. https://doi.org/10.1109/ICIP42928.2021.9506069
19. Hariri W. Efficient masked face recognition method during the covid-19 pandemic. *Signal, Image and Video Processing*, 2022, vol. 16, no. 3, pp. 605–612. https://doi.org/10.1007/s11760-021-02050-w
20. Maharani D.A., MacHbub C., Rusmin P.H., Yulianti L. Improving the capability of real-time face masked recognition using cosine distance. *Proc. of the 6th International Conference on Interactive Digital Media (ICIDM)*, 2020, pp. 9339677. https://doi.org/10.1109/ICIDM51048.2020.9339677
21. Montero D., Nieto M., Leskovsky P., Aginako N. Boosting masked face recognition with multi-task arcface. *arXiv*, 2021, arXiv:2104.09874. https://doi.org/10.48550/arXiv.2104.09874
22. Golwalkar R., Mehendale N. Masked Face Recognition Using Deep Metric Learning and FaceMaskNet21. *SSRN Electronic Journal*, 2020, pp. 3731223. http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3731223

ACM International Conference on Multimedia. 2020. P. 3016–3024. https://doi.org/10.1145/3394171.3413960
24. Hong Q., Wang Z., He Z., Wang N., Tian X., Lu T. Masked face recognition with identification association // Proc. of the IEEE 32nd International Conference on Tools with Artificial Intelligence (ICTAI). 2020. P. 731–735. https://doi.org/10.1109/ICTAI50040.2020.00116
25. Mandal B., Okeukwu A., Theis Y. Masked face recognition using ResNet-50 // arXiv. 2021. arXiv:2104.08997. https://doi.org/10.48550/arXiv.2104.08997
26. Du H., Shi H., Liu Y., Zeng D., Mei T. Towards NIR-VIS masked face recognition // IEEE Signal Processing Letters. 2021. V. 28. P. 768–772. https://doi.org/10.1109/LSP.2021.3071663
27. Wu G.L. Masked face recognition algorithm for a contactless distribution cabinet // Mathematical Problem in Engineering. 2021. V. 2021. P. 5591020. https://doi.org/10.1155/2021/5591020
28. Li Y., Guo K., Lu Y., Liu L. Cropping and attention based approach for masked face recognition // Applied Intelligence. 2021. V. 51. N 5. P. 3012–3025. https://doi.org/10.1007/s10489-020-02100-9
29. Gover A.R., Harper S.B., Langton L. Anti-Asian hate crime during the COVID-19 pandemic: Exploring the reproduction of inequality // American Journal of Criminal Justice. 2020. V. 45. N 4. P. 647–667. https://doi.org/10.1007/s12103-020-09545-1
30. Saeidi R., Niemi T., Karppelin H., Pohjalainen J., Kinnunen T., Alku P. Speaker recognition for speech under face cover // Proc. of the Interspeech. 2015. P. 1012–1016. https://doi.org/10.21437/Interspeech.2015-275
31. Zhang C., Tan T. Voice disguise and automatic speaker recognition // Forensic Science International. 2008. V. 175. N 2-3. P. 118–122. https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2007.05.019
32. Fecher N. The “audio-visual face cover corpus”: investigations into audio-visual speech and speaker recognition when the speaker’s face is occluded by facewear // Proc. of the 13th Annual Conference of the International Speech Communication Association (INTERSPEECH). 2012. P. 2250–2253. https://doi.org/10.21437/Interspeech.2012-133
33. Iszatt T., Malkoc E., Kelly F., Alexander A. Exploring the impact of face coverings on x-vector speaker recognition using VOCALISE // Poc. of the Conference: International Association of Forensic Phonetics and Acoustics. 2021.
34. Schuller B.W., Batliner A., Bergler C., Messner E.-M., Hamilton A., Amiriparian S., Baird A., Rizos G., Schmitt M., Stappen L., Baumeister H., MacIntyre D.A., Hantke S. The interspeech 2020 computational paralinguistics challenge: Elderly emotion, breathing & masks // Proc. of the Interspeech. 2020. P. 2042–2046. https://doi.org/10.21437/Interspeech.2020-32
35. Montacié C., Caraty M. J. Phonetic, frame clustering and intelligibility analyses for the INTERSPEECH 2020 ComParE Challenge // Proc. of the 21st Annual Conference of the International Speech Communication Association (INTERSPEECH). 2020. P. 2062–2066. https://doi.org/10.21437/Interspeech.2020-2243
36. Рюмина Е.В., Рюмин Д.А., Маркитантов М.В., Карпов А.А. Метод генерации обучающих данных для компьютерной системы обнаружения защитных масок на лицах людей // Компьютерная оптика. 2022. Т. 46. в печати.
37. Przybocki M.A., Martin A.F., Le A.N. NIST speaker recognition evaluations utilizing the Mixer corpora–2004, 2005, 2006 // IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing. 2007. V. 15. N 7. P. 1951–1959. https://doi.org/10.1109/TASL.2007.902489
38. Alam M.R., Bennamoun M., Togneri R., Sohel F. An efficient reliability estimation technique for audio-visual person identification // Proc. of the IEEE 8th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA). 2013. P. 1631–1635. https://doi.org/10.1109/ICIEA.2013.6566630
39. Zhao X., Evans N., Dugelay J.-L. Multi-view semi-supervised discriminant analysis: A new approach to audio-visual person recognition // Proc. of the 20th European Signal Processing Conference (EUSIPCO). 2012. P. 31–35.
40. Nishino T., Kajikawa Y., Muneyasu M. Multimodal person authentication system using features of utterance // Proc. of the 20th International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communications Systems (ISPACS). 2012. P. 43–47. https://doi.org/10.1109/ISPACS.2012.6473450
41. Alam M.R., Bennamoun M., Togneri R., Sohel F. A joint deep Boltzmann machine (jDBM) model for person identification using mobile phone data // IEEE Transactions on Multimedia. 2017. V. 19. N 2. P. 317–326. https://doi.org/10.1109/TMM.2016.2615524

23. Li C., Ge S., Zhang D., Li J. Look through masks: Towards masked face recognition with de-occlusion distillation. *Proc. of the 28th ACM International Conference on Multimedia*, 2020, pp. 3016–3024. https://doi.org/10.1145/3394171.3413960
24. Hong Q., Wang Z., He Z., Wang N., Tian X., Lu T. Masked face recognition with identification association. *Proc. of the IEEE 32nd International Conference on Tools with Artificial Intelligence (ICTAI)*, 2020, pp. 731–735. https://doi.org/10.1109/ICTAI50040.2020.00116
25. Mandal B., Okeukwu A., Theis Y. Masked face recognition using ResNet-50. *arXiv*, 2021, arXiv:2104.08997. https://doi.org/10.48550/arXiv.2104.08997
26. Du H., Shi H., Liu Y., Zeng D., Mei T. Towards NIR-VIS masked face recognition. *IEEE Signal Processing Letters*, 2021, vol. 28, pp. 768–772. https://doi.org/10.1109/LSP.2021.3071663
27. Wu G.L. Masked face recognition algorithm for a contactless distribution cabinet. *Mathematical Problem in Engineering*, 2021, vol. 2021, pp. 5591020. https://doi.org/10.1155/2021/5591020
28. Li Y., Guo K., Lu Y., Liu L. Cropping and attention based approach for masked face recognition. *Applied Intelligence*, 2021, vol. 51, no. 5, pp. 3012–3025. https://doi.org/10.1007/s10489-020-02100-9
29. Gover A.R., Harper S.B., Langton L. Anti-Asian hate crime during the COVID-19 pandemic: Exploring the reproduction of inequality. *American Journal of Criminal Justice*, 2020, vol. 45, no. 4, pp. 647–667. https://doi.org/10.1007/s12103-020-09545-1
30. Saeidi R., Niemi T., Karppelin H., Pohjalainen J., Kinnunen T., Alku P. Speaker recognition for speech under face cover. *Proc. of the Interspeech*, 2015, pp. 1012–1016. https://doi.org/10.21437/Interspeech.2015-275
31. Zhang C., Tan T. Voice disguise and automatic speaker recognition. *Forensic Science International*, 2008, vol. 175, no. 2-3, pp. 118–122. https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2007.05.019
32. Fecher N. The “audio-visual face cover corpus”: investigations into audio-visual speech and speaker recognition when the speaker’s face is occluded by facewear. *Proc. of the 13th Annual Conference of the International Speech Communication Association (INTERSPEECH)*, 2012, pp. 2250–2253. https://doi.org/10.21437/Interspeech.2012-133
33. Iszatt T., Malkoc E., Kelly F., Alexander A. Exploring the impact of face coverings on x-vector speaker recognition using VOCALISE. *Poc. of the Conference: International Association of Forensic Phonetics and Acoustics*, 2021.
34. Schuller B.W., Batliner A., Bergler C., Messner E.-M., Hamilton A., Amiriparian S., Baird A., Rizos G., Schmitt M., Stappen L., Baumeister H., MacIntyre D.A., Hantke S. The interspeech 2020 computational paralinguistics challenge: Elderly emotion, breathing & masks. *Proc. of the Interspeech*, 2020, pp. 2042–2046. https://doi.org/10.21437/Interspeech.2020-32
35. Montacié C., Caraty M. J. Phonetic, frame clustering and intelligibility analyses for the INTERSPEECH 2020 ComParE Challenge. *Proc. of the 21st Annual Conference of the International Speech Communication Association (INTERSPEECH)*, 2020, pp. 2062–2066. https://doi.org/10.21437/Interspeech.2020-2243
36. Riumina E.V., Riumin D.A., Markitantov M.V., Karpov A.A. A method for generating training data for a protective face mask detection system. *Computer Optics*, 2022, vol. 46. in press (in Russian).
37. Przybocki M.A., Martin A.F., Le A.N. NIST speaker recognition evaluations utilizing the Mixer corpora–2004, 2005, 2006. *IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, 2007, vol. 15, no. 7, pp. 1951–1959. https://doi.org/10.1109/TASL.2007.902489
38. Alam M.R., Bennamoun M., Togneri R., Sohel F. An efficient reliability estimation technique for audio-visual person identification. *Proc. of the IEEE 8th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*, 2013, pp. 1631–1635. https://doi.org/10.1109/ICIEA.2013.6566630
39. Zhao X., Evans N., Dugelay J.-L. Multi-view semi-supervised discriminant analysis: A new approach to audio-visual person recognition. *Proc. of the 20th European Signal Processing Conference (EUSIPCO)*, 2012, pp. 31–35.
40. Nishino T., Kajikawa Y., Muneyasu M. Multimodal person authentication system using features of utterance. *Proc. of the 20th International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communications Systems (ISPACS)*, 2012, pp. 43–47. https://doi.org/10.1109/ISPACS.2012.6473450
41. Alam M.R., Bennamoun M., Togneri R., Sohel F. A joint deep Boltzmann machine (jDBM) model for person identification using

42. Gofman M., Sandico N., Mitra S., Suo E., Muhi S., Vu T. Multimodal biometrics via discriminant correlation analysis on mobile devices // Proc. of the International Conference on Security and Management (SAM). The Steering Committee of The World Congress in Computer Science, Computer Engineering and Applied Computing (WorldComp). 2018. P. 174–181.
43. Shenoy R.V. Hidden Markov Models for Analysis of Multimodal Biomedical Images: A dissertation submitted in partial satisfaction of the requirements for the degree Doctor of Philosophy in Electrical and Computer Engineering / University of California, Santa Barbara, 2016. 99 p.
44. Chen Y., Yang J., Wang C., Liu N. Multimodal biometrics recognition based on local fusion visual features and variational Bayesian extreme learning machine // Expert Systems with Applications. 2016. V. 64. P. 93–103. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2016.07.009
45. Garau M., Fraschini M., Didaci L., Marcialis G.L. Experimental results on multi-modal fusion of EEG-based personal verification algorithms // Proc. of the 9th International Conference on Biometrics (ICB). 2016. P. 7550080. https://doi.org/10.1109/ICB.2016.7550080
46. Shen L., Zheng N., Zheng S., Li W. Secure mobile services by face and speech based personal authentication // Proc. of the IEEE International Conference on Intelligent Computing and Intelligent Systems (ICIS). V. 3. 2010. P. 97–100. https://doi.org/10.1109/ICICISYS.2010.5658534
47. Irfan B., Ortiz M.-G., Lyubova N., Belpaeme T. Multi-modal open-set person identification in HRI // Proc. of the 2018 ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction Social Robots in the Wild workshop. 2018.
48. Antipov G., Gengembre N., Le Blouch O., Le Lan G. Automatic quality assessment for audio-visual verification systems. The LOVe submission to NIST SRE challenge 2019 // Proc. of the 21st Annual Conference of the International Speech Communication Association (INTERSPEECH). 2020. P. 2237–2241. https://doi.org/10.21437/Interspeech.2020-1434
49. Estival D., Cassidy S., Cox F., Burnham D. AusTalk: an audio-visual corpus of Australian English // Proc. of the Ninth International Conference on Language Resources and Evaluation (LREC'14). 2014.
50. Khoury E., El Shafey L., McCool C., Günther M., Marcel S. Bi-modal biometric authentication on mobile phones in challenging conditions // Image and Vision Computing. 2014. V. 32. N 12. P. 1147–1160. https://doi.org/10.1016/j.imavis.2013.10.001
51. McCool C., Marcel S. MOBIO database for the ICPR 2010 face and speech competition: Idiap Communication Report. Idiap Research Institute, 2009.
52. Alam M.R., Togneri R., Sohel F., Bennamoun M., Naseem I. Linear regression-based classifier for audio visual person identification // Proc. of the 1st International Conference on Communications, Signal Processing, and their Applications (ICCSPA). 2013. P. 6487281. https://doi.org/10.1109/ICCSPA.2013.6487281
53. Tresadern P., Cootes T.F., Poh N., Matejka P., Hadid A., Lévy C., McCool C., Marcel S. Mobile biometrics: Combined face and voice verification for a mobile platform // IEEE Pervasive Computing. 2013. V. 12. N 1. P. 79–87. https://doi.org/10.1109/MPRV.2012.54
54. Islam R., Sobhan A. BPN based likelihood ratio score fusion for audio-visual speaker identification in response to noise // International Scholarly Research Notices. 2014. V. 2014. P. 737814. https://doi.org/10.1155/2014/737814
55. Primorac R., Togneri R., Bennamoun M., Sohel F. Audio-visual biometric recognition via joint sparse representations // Proc. of the 23rd International Conference on Pattern Recognition (ICPR). 2016. P. 3031–3035. https://doi.org/10.1109/ICPR.2016.7900099
56. Memon Q., AlKassim Z., AlHassan E., Omer M., Alsiddig M. Audio-visual biometric authentication for secured access into personal devices // Proc. of the 6th International Conference on Bioinformatics and Biomedical Science (ICBBS). 2017. P. 85–89. https://doi.org/10.1145/3121138.3121165
57. Gofman M.I., Mitra S., Cheng T.-H.K., Smith N.T. Multimodal biometrics for enhanced mobile device security // Communications of the ACM. 2016. V. 59. N 4. P. 58–65. https://doi.org/10.1145/2818990
58. Sadjadi S.O., Greenberg C., Singer E., Reynolds D., Mason L., Hernandez-Cordero J. The 2019 NIST speaker recognition evaluation CTS challenge // Proc. of the Speaker and Language Recognition Workshop (Odyssey 2020). 2020. P. 266–272. https://doi.org/10.21437/Odyssey.2020-38

mobile phone data. *IEEE Transactions on Multimedia*, 2017, vol. 19, no. 2, pp. 317–326. https://doi.org/10.1109/TMM.2016.2615524
42. Gofman M., Sandico N., Mitra S., Suo E., Muhi S., Vu T. Multimodal biometrics via discriminant correlation analysis on mobile devices. *Proc. of the International Conference on Security and Management (SAM)*. The Steering Committee of The World Congress in Computer Science, Computer Engineering and Applied Computing (WorldComp), 2018, P. 174–181.
43. Shenoy R.V. *Hidden Markov Models for Analysis of Multimodal Biomedical Images*: A dissertation submitted in partial satisfaction of the requirements for the degree Doctor of Philosophy in Electrical and Computer Engineering. University of California, Santa Barbara, 2016, 99 p.
44. Chen Y., Yang J., Wang C., Liu N. Multimodal biometrics recognition based on local fusion visual features and variational Bayesian extreme learning machine. *Expert Systems with Applications*, 2016, vol. 64, pp. 93–103. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2016.07.009
45. Garau M., Fraschini M., Didaci L., Marcialis G.L. Experimental results on multi-modal fusion of EEG-based personal verification algorithms. *Proc. of the 9th International Conference on Biometrics (ICB)*, 2016, pp. 7550080. https://doi.org/10.1109/ICB.2016.7550080
46. Shen L., Zheng N., Zheng S., Li W. Secure mobile services by face and speech based personal authentication. *Proc. of the IEEE International Conference on Intelligent Computing and Intelligent Systems (ICIS)*. Vol. 3, 2010, pp. 97–100. https://doi.org/10.1109/ICICISYS.2010.5658534
47. Irfan B., Ortiz M.-G., Lyubova N., Belpaeme T. Multi-modal open-set person identification in HRI. *Proc. of the 2018 ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction Social Robots in the Wild workshop*, 2018.
48. Antipov G., Gengembre N., Le Blouch O., Le Lan G. Automatic quality assessment for audio-visual verification systems. The LOVe submission to NIST SRE challenge 2019. *Proc. of the 21st Annual Conference of the International Speech Communication Association (INTERSPEECH)*, 2020, pp. 2237–2241. https://doi.org/10.21437/Interspeech.2020-1434
49. Estival D., Cassidy S., Cox F., Burnham D. AusTalk: an audio-visual corpus of Australian English. *Proc. of the Ninth International Conference on Language Resources and Evaluation (LREC'14)*, 2014.
50. Khoury E., El Shafey L., McCool C., Günther M., Marcel S. Bi-modal biometric authentication on mobile phones in challenging conditions. *Image and Vision Computing*, 2014, vol. 32, no. 12, pp. 1147–1160. https://doi.org/10.1016/j.imavis.2013.10.001
51. McCool C., Marcel S. *MOBIO database for the ICPR 2010 face and speech competition*. Idiap Communication Report. Idiap Research Institute, 2009.
52. Alam M.R., Togneri R., Sohel F., Bennamoun M., Naseem I. Linear regression-based classifier for audio visual person identification. *Proc. of the 1st International Conference on Communications, Signal Processing, and their Applications (ICCSPA)*, 2013, pp. 6487281. https://doi.org/10.1109/ICCSPA.2013.6487281
53. Tresadern P., Cootes T.F., Poh N., Matejka P., Hadid A., Lévy C., McCool C., Marcel S. Mobile biometrics: Combined face and voice verification for a mobile platform. *IEEE Pervasive Computing*, 2013, vol. 12, no. 1, pp. 79–87. https://doi.org/10.1109/MPRV.2012.54
54. Islam R., Sobhan A. BPN based likelihood ratio score fusion for audio-visual speaker identification in response to noise. *International Scholarly Research Notices*, 2014, vol. 2014, pp. 737814. https://doi.org/10.1155/2014/737814
55. Primorac R., Togneri R., Bennamoun M., Sohel F. Audio-visual biometric recognition via joint sparse representations. *Proc. of the 23rd International Conference on Pattern Recognition (ICPR)*, 2016, pp. 3031–3035. https://doi.org/10.1109/ICPR.2016.7900099
56. Memon Q., AlKassim Z., AlHassan E., Omer M., Alsiddig M. Audio-visual biometric authentication for secured access into personal devices. *Proc. of the 6th International Conference on Bioinformatics and Biomedical Science (ICBBS)*, 2017, pp. 85–89. https://doi.org/10.1145/3121138.3121165
57. Gofman M.I., Mitra S., Cheng T.-H.K., Smith N.T. Multimodal biometrics for enhanced mobile device security. *Communications of the ACM*, 2016, vol. 59, no. 4, pp. 58–65. https://doi.org/10.1145/2818990
58. Sadjadi S.O., Greenberg C., Singer E., Reynolds D., Mason L., Hernandez-Cordero J. The 2019 NIST speaker recognition evaluation CTS challenge. *Proc. of the Speaker and Language Recognition*

59. Yu C., Huang L. Biometric recognition by using audio and visual feature fusion // Proc. of the 2012 International Conference on System Science and Engineering (ICSSE). 2012. P. 173178. https://doi.org/10.1109/ICSSE.2012.6257171

*Workshop (Odyssey 2020)*, 2020, pp. 266–272. https://doi.org/10.21437/Odyssey.2020-38
59. Yu C., Huang L. Biometric recognition by using audio and visual feature fusion. *Proc. of the 2012 International Conference on System Science and Engineering (ICSSE)*, 2012, pp. 173178. https://doi.org/10.1109/ICSSE.2012.6257171

### Авторы

**Косулин Кирилл Эдгарович** — аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация; программист, Филиал ООО «Люксофт Профеншнл» в городе Санкт-Петербург, Санкт-Петербург, 195027, Российская Федерация, https://orcid.org/0000-0002-1324-2813, leliclalelic@yandex.ru

**Карпов Алексей Анатольевич** — доктор технических наук, профессор, Лаборатория речевых и многомодальных интерфейсов, главный научный сотрудник, Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук, Санкт-Петербург, 199178, Российская Федерация; профессор, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, SC 57195330987, https://orcid.org/0000-0003-3424-652X, karpov@iias.spb.su

### Authors

**Kirill E. Kosulin** — PhD Student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation; Software Developer, Luxoft Branch, Saint Petersburg, 195027, Russian Federation, https://orcid.org/0000-0002-1324-2813, leliclalelic@yandex.ru

**Alexey A. Karpov** — D. Sc., Professor, Chief Researcher, Multimodal Interfaces Laboratory at the Saint Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS), Saint Petersburg, 199178, Russian Federation; Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, SC 57195330987, https://orcid.org/0000-0003-3424-652X, karpov@iias.spb.su

*Статья поступила в редакцию 18.02.2022*
*Одобрена после рецензирования 31.03.2022*
*Принята к печати 31.05.2022*

*Received 18.02.2022*
*Approved after reviewing 31.03.2022*
*Accepted 31.05.2022*

Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ
май–июнь 2022 Том 22 № 3 http://ntv.ifmo.ru/
SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL OF INFORMATION TECHNOLOGIES, MECHANICS AND OPTICS
May–June 2022 Vol. 22 No 3 http://ntv.ifmo.ru/en/
ISSN 2226-1494 (print) ISSN 2500-0373 (online)

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК УНИВЕРСИТЕТ ИТМО
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ

ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ

OPTICAL ENGINEERING

doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-3-433-441
УДК 535.417; 535.317; 778.38

# Влияние соотношения интенсивностей опорной и объектной волн на распределение интенсивности в формируемом с их помощью голографическом поле

**Сергей Николаевич Корешев[1], Сергей Олегович Старовойтов[2]✉**

[1] Филиал АО «Корпорация «Комета» – «Научно-проектный центр оптоэлектронных комплексов наблюдения», Санкт-Петербург, 194021, Российская Федерация
[2] Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация
[2] Санкт-Петербургский информационно-аналитический центр, Санкт-Петербург, 191040, Российская Федерация

[1] koreshev@list.ru, https://orcid.org/0000-0002-8728-6122
[2] s.starovoitov95@gmail.com✉, https://orcid.org/0000-0003-4429-7929

**Аннотация**

**Предмет исследования.** Представлены результаты исследования влияния соотношения интенсивностей опорного и объектного пучков на модуляцию коэффициента пропускания синтезированных и аналоговых голограмм. Особое внимание уделено режиму формирования голограммы, при котором интенсивность объектного пучка превышает интенсивность опорного пучка (режим перемодуляции). Работа актуальна в случаях применения синтезированных голограмм в проекционной фотолитографии в глубоком ультрафиолете. **Метод.** Выполнено математическое моделирование физических процессов записи и восстановления голограмм-проекторов. Характеристический размер бинарного тестового объекта составил 80 × 80, длина волны используемого излучения 13,5 нм, размер пиксела голограммы 20 × 20, расстояние между плоскостями объекта и голограммы 20,4 мкм, угол падения плоской опорной волны 14°42′. Синтез и восстановление голограмм-проекторов выполнены в режиме перемодуляции, при различном ходе лучей в объектном пучке. **Основные результаты.** Показано, что небинаризованные синтезированные голограммы всегда отображаются и восстанавливаются как квантованные голограммы с интервалом квантования, в зависимости от параметров схемы синтеза. Установлено, что влияние режима перемодуляции на качество восстановленного изображения при использовании синтезированных голограмм значительно уменьшается при использовании аналоговых голограмм, но также определяется динамическим диапазоном интенсивности объектного пучка в плоскости синтеза голограммы. Отмечено, что при синтезе голограммы влияние режима перемодуляции минимально при использовании объектного пучка, сходящегося в центре голограммы. **Практическая значимость.** Выбор правильного интервала квантования и соотношения интенсивностей опорного и объектного пучков позволяет обеспечить высокое качество восстанавливаемого изображения при использовании синтезированных голограмм-проекторов Френеля в проекционной фотолитографии в глубоком ультрафиолете.

**Ключевые слова**

голография, синтезированные голограммы, восстановление голограммы, фотолитография, полутоновые голограммы, соотношение интенсивностей объектного и опорного пучков, режим перемодуляции

**Благодарности**

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта НИРМА Физико-технического мегафакультета Университета ИТМО.

**Ссылка для цитирования:** Корешев С.Н., Старовойтов С.О. Влияние соотношения интенсивностей опорной и объектной волн на распределение интенсивности в формируемом с их помощью голографическом поле // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2022. Т. 22, № 3. С. 433–441. doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-3-433-441

© Корешев С.Н., Старовойтов С.О., 2022

# Influence of the ratio of the intensities of the reference and object waves on the intensity distribution in the holographic field

**Sergey N. Koreshev[1], Sergey O. Starovoitov[2]✉**

[1] Branch of JSC Corporation "Kometa", Saint Petersburg, 194021, Russian Federation
[2] ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation
[2] Saint Petersburg Information and Analytical Center, Saint Petersburg, 191040, Russian Federation

[1] koreshev@list.ru, https://orcid.org/0000-0002-8728-6122
[2] s.starovoitov95@gmail.com✉, https://orcid.org/0000-0003-4429-7929

**Abstract**

The results of the research focused on the reference and object beam intensity ratio effect on the transmittance of computer-generated and analog holograms are presented. Particular attention is paid to the hologram synthesis mode in which the intensity of the object beam exceeds the intensity of the reference beam (overmodulation mode). The study is relevant in cases where computer-generated holograms are used in extreme ultraviolet projection photolithography. Mathematical modeling of the physical processes of recording and reconstructing holograms has been performed. The characteristic size of the binary test object was 80 × 80 nm, the radiation wavelength was 13.5 nm, the hologram pixel size was 20 × 20 nm, the distance between the object and hologram planes was 20.4 μm, and the incidence angle of the plane reference wave was 14°42′. Synthesis and reconstruction of holograms were carried out in an overmodulation mode, with different beam paths in the object beam. It is shown that the computer-generated holograms, unless binarized, are always displayed and reconstructed as quantized holograms with a quantization interval depending on the parameters of the synthesis scheme. It has been established that the influence of the overmodulation mode on the quality of the reconstructed image when using computer-generated holograms will be much less than in the case of using analog holograms, but will also be determined by the dynamic range of the object beam intensity in the hologram synthesis plane. It is noted that the influence of overmodulation mode is minimal if an object beam converging at the center of the hologram is used during synthesis. The choice of the adequate quantization interval and the ratio of the intensities of the reference and object beams will ensure high quality of the reconstructed image when using computer-generated Fresnel holograms in extreme ultraviolet projection photolithography.

**Keywords**

holography, computer-generated holograms, hologram reconstruction, photolithography, halftone holograms, intensity ratio between object and reference beam, overmodulation mode

**Acknowledgements**

The study is funded by RPMA grant of School of Physics and Engineering of ITMO University.

**For citation:** Koreshev S.N., Starovoitov S.O. Influence of the ratio of the intensities of the reference and object waves on the intensity distribution in the holographic field. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2022, vol. 22, no. 3, pp. 433–441 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-3-433-441

## Введение

Синтезированные голограммы в настоящее время применяются во многих областях науки и техники. Проекционная фотолитография представляется одной из наиболее перспективных сфер их использования [1–5]. Это обусловлено возможностью таких голограмм формировать большие по площади и свободные от аберраций действительные изображения, в том числе изображения объектов, широко применяемых в фотолитографическом процессе — бинарных амплитудных транспарантов.

При современном уровне развития компьютерной техники синтез голограмм таких объектов не требует значительных затрат временных и вычислительных ресурсов.

Использование голограмм в фотолитографии позволяет исключить из схем фотолитографических установок многокомпонентные проекционные объективы, конструкция которых постоянно усложняется из-за уменьшения проектных норм изготавливаемой полупроводниковой продукции. Отметим, что для успешного практического применения синтезированных голограмм в фотолитографическом процессе требуется, чтобы восстановленные изображения обладали качеством и глубиной резкости, достаточными для корректного отображения транспаранта на фоточувствительном носителе — фоторезисте. При этом недопустимо наличие разрывов, не предусмотренных топологией изготавливаемого изделия, а изменение размеров элементов структуры изделия относительно рассчитанных значений не должно превышать 10 %.

Процесс получения синтезированной голограммы можно разделить на два последовательных этапа: компьютерный расчет структуры и физическое изготовление рассчитанной голограммы с использованием установок электронно-лучевой литографии. Каждый этап характеризуется рядом факторов, способных оказать существенное влияние на изображающие свойства получаемой голограммы, а значит, и на качество восстанавливаемого изображения.

Рассмотрим начальный этап получения синтезированной голограммы. Применение компьютерных технологий для синтеза голограмм вместо непосредственной регистрации на фоточувствительном носителе реально существующего голографического поля приводит к тому, что подобные голограммы обладают рядом особенностей, отличающих их от традиционных, так называемых физических голограмм. Например, дискретная структура синтезированных голограмм предъявляет специфические требования к условиям их регистрации и восстановления, что в ряде случаев приводит к огра-

ничению качества восстанавливаемых изображений. В то же время компьютерный синтез голограмм позволяет при выполнении определенных условий добиться улучшения их изображающих свойств. Например, существует возможность значительно увеличить глубину резкости восстанавливаемого изображения за счет изменения формы представления голографируемого объекта [6–8], а также уменьшить влияние спеклов на качество изображения путем применения различных методик пространственной фильтрации [9–11].

В настоящей работе рассмотрен один из ключевых параметров схемы записи голограмм, оказывающих влияние на их изображающие свойства — соотношение интенсивностей объектного и опорного пучков и их влияние на качество восстановленного изображения. Отметим, что, как правило, при компьютерном синтезе голограмм Френеля это соотношение принимают равным 1:1 [12]. Проблема влияния соотношения между интенсивностями объектного и опорного пучков в процессе физической записи голограмм, а также их компьютерного синтеза, известна из научных публикаций. Так, в работах [13, 14] показано, что несмотря на то, что условием получения максимальной видности регистрируемых интерференционных полос голографического поля является равенство единице отношения интенсивностей опорной и объектной волн, для обеспечения условия линейности записи голограммы данное отношение должно быть более единицы. Особенно актуально данное условие для случая диффузной подсветки голографируемого объекта. Использование опорной волны, превосходящей по интенсивности объектную, позволяет бороться с интермодуляционными помехами в восстановленном изображении [15–18] и увеличивает дифракционную эффективность записываемых голографических дифракционных решеток [19]. При этом режим перемодуляции — случай, в котором интенсивность объектной волны превышает интенсивность опорной, и влияние этого режима на вид и качество восстановленного изображения, особенно при использовании цифровых и синтезированных голограмм, подробно в научных работах не рассматривался.

## Анализ влияния соотношения интенсивностей опорной и объектной волн на распределение интенсивности формируемого с их помощью голографического поля

Рассмотрим влияние соотношения интенсивностей опорной и объектной волн на распределение интенсивности формируемого голографического поля. Примем, что амплитуда опорной волны $A_r$ в плоскости регистрации голограммы, за исключением случая протяженного опорного источника, постоянна или слабо изменяется. Допустим, что $A_r$ постоянна для всех точек апертуры голограммы. Переменную по апертуре голограммы амплитуду объектной волны $A_o$ опишем в виде произведения $A_r$ и некоторого переменного по апертуре голограммы множителя $m$, зависящего от координат $x$ и $y$ рассматриваемой точки голографического поля:

$$A_o = m(x, y)A_r.$$

Отметим, что множитель $m$ положителен в точках апертуры голограммы, в которых опорная и объектная волны синфазны, и отрицателен там, где они находятся в противофазе. В этом случае распределение интенсивности голографического поля в плоскости регистрации голограммы $I(x, y)$:

$$I(x, y) = A_rA_r^* + m^2(x, y)A_rA_r^* + 2m(x, y)A_rA_r^* = I_r[1 + m(x, y)]^2, \quad (1)$$

где $I_r$ — интенсивность опорной волны; $A_r^*$ — величина, комплексно-сопряженная амплитуде опорной волны. Из (1) получим выражения, описывающие максимальное $I_{max}$ и минимальное $I_{min}$ значения интенсивностей голографического поля в плоскости регистрации голограммы:

$$I_{max} = I_r[1 + m(x, y)]^2,$$
$$I_{min} = I_r[1 - m(x, y)]^2.$$

Рассмотрим опорную волну, превышающую по интенсивности объектную, т. е. примем модуль $m$ лежащим в пределах от 0 до 1. В этом случае интенсивность голографического поля будет изменяться по апертуре голограммы в пределах от 0 до 4 $I_r$. Для линейной регистрации такой голограммы регистрирующая среда должна обладать характеристической кривой, линейной в интервале экспозиций от 0 до 4 $I_rt$, где $t$ — время экспонирования голограммы, соответствующее середине линейного участка характеристической кривой регистрирующей среды. При этом средняя экспозиция, оптимальная для всех значений $m$ указанного выше интервала, будет постоянной, т. е. не зависящей от $A_o = 2I_rt$.

В случае амплитуды объектной волны, превышающей, либо равной амплитуде опорной волны, модуль множителя $m$ будет превышать или равен 1.

Допустим, модуль лежит в пределах от 1 до $N$. Тогда для $N$, много больших единицы, амплитуда модуляции интенсивности голографического поля будет стремиться к 0, а сама интенсивность голографического поля примерно равна $N^2I_r$. При этом для обеспечения линейности регистрации голограммы оптимальное среднее время экспонирования $t$ должно выбираться таким, чтобы середина линейного участка характеристической кривой была близка к экспозиции $tN^2I_r$. Рассмотрим случай, когда $m$ незначительно превышает по модулю 1, например $m$ = 1,5. Тогда интенсивность голографического поля будет лежать в пределах от 0,25 $I_r$ до 6,25 $I_r$, т. е. требуемый для линейной регистрации голограммы линейный участок характеристической кривой значительно увеличился. Его середина при этом должна соответствовать экспозиции 3,25 $tI_r$. При $m = |4|$ интенсивность голографического поля будет лежать в пределах от 9 $I_r$ до 25 $I_r$, а необходимая величина средней экспозиции равна 17 $tI_r$. Полученные результаты показаны на рис. 1.

Из графиков видно, что режим формирования голографического поля, при котором интенсивность опорной волны превышает интенсивность объектной, характеризуется минимальными требованиями к линей-

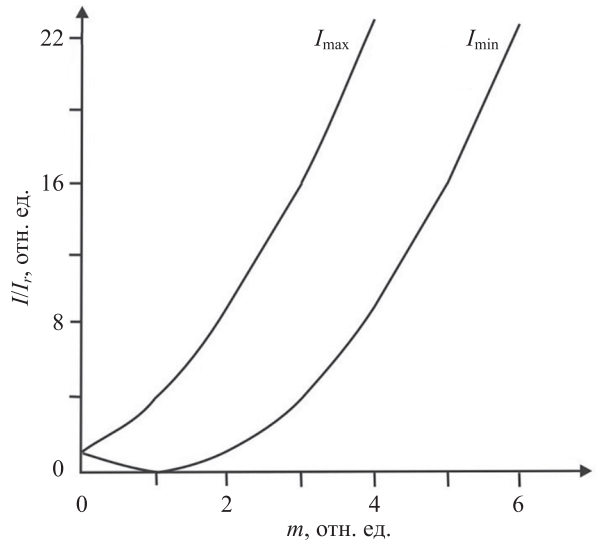



*Рис. 1*. Графики зависимости максимальной и минимальной интенсивностей голографического поля от величины множителя *m*

*Fig. 1*. Graph of the maximum and minimum intensities of the holographic field versus the value of the multiplier *m*

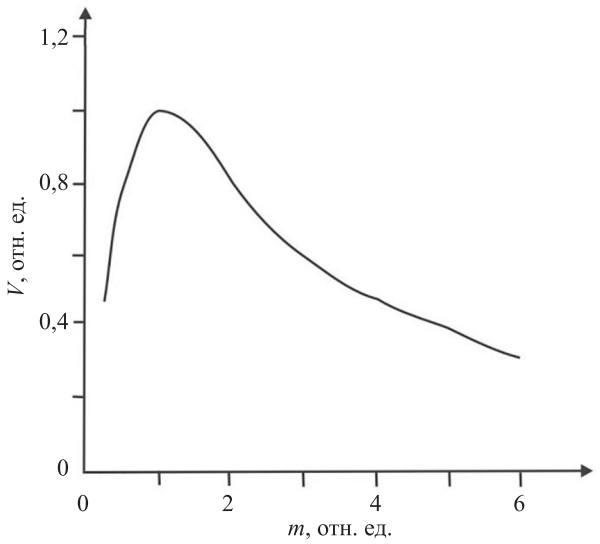



*Рис. 2*. График зависимости видности голографического поля от величины множителя *m*

*Fig. 2*. Grapf of the interferometric visibility of the holographic field versus the value of the multiplier *m*

ности характеристической кривой используемой для регистрации голограммы регистрирующей среды. При этом такой режим обеспечивает возможность выбора оптимального времени экспонирования голограммы для всех точек ее апертуры, т. е. выбор времени экспонирования, не зависящего от $A_o$. Заметим, что выбор времени экспонирования осуществляется таким образом, чтобы средняя экспозиция при регистрации голограммы приблизительно соответствовала середине линейного участка характеристической кривой регистрирующей среды. Переход в режим перемодуляции, при котором интенсивность объектной волны превышает интенсивность опорной, приводит к необходимости использования регистрирующих сред с большим интервалом экспозиций, соответствующих линейному участку характеристической кривой и к невозможности выбора единого для всей апертуры голограммы времени ее экспонирования. При этом с ростом множителя *m*, при значениях, существенно превышающих 1, одновременно уменьшаются видность голографического поля *V* и оптимальная величина времени экспонирования голограммы. Отметим, что видность голографического поля *V* определяется в соответствии с выражением:

$$V = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}}.$$

Видность голографического поля — одна из важнейших характеристик, определяющих дифракционную эффективность получаемых голограмм. График зависимости видности от множителя *m* представлен на рис. 2.

Главная опасность режима перемодуляции заключена не столько в уменьшении видности и дифракционной эффективности голограммы, сколько в отсутствии возможности выбора единого для всей апертуры голограммы оптимального времени ее экспонирования, приводящей к значительной нелинейности регистрируемой голограммы. Результатом нелинейности могут быть помехи и артефакты в восстановленных голограммах.

Приведенные выше рассуждения справедливы для случаев аналоговых и цифровых голограмм. В случае синтезированных голограмм, особенно голограмм, восстанавливаемых в виртуальном пространстве, процесс восстановления протекает иначе. Это связано с тем, что при синтезе голограмм время экспонирования считается постоянным, а значение $I_{max}$ приравнивается к максимальному числу отображаемых градаций. В случае представления синтезированных голограмм с использованием так называемой «серой шкалы» $I_{max}$ =256 [20]. Рассчитаем значение одной градации $\delta I$:

$$\delta I = \frac{I_r(1 + m_{max})^2}{256}, \qquad (2)$$

где $m_{max}$ — значение множителя *m*, соответствующего максимальной амплитуде объектного пучка в какой-либо точке плоскости синтеза голограммы. Из (2) следует, что синтезированные голограммы нельзя считать полутоновыми, поскольку учитываемое при их отображении на носителе изменение интенсивности голографического поля не может быть менее $\delta I$. Таким образом, синтезированные голограммы, если они не были бинаризованы, всегда отображаются и восстанавливаются как квантованные голограммы с интервалом квантования, описываемым выражением (2). При отображении таких голограмм на носителе все интервалы интенсивности голографического поля, лежащие в пределах от $k\delta I$ до $(k + 1)\delta I$, где $k$ — постоянная, будут отображены на носителе равными этим двум значениям интервалов, причем какое из значений будет отображено, определяется средним значением интенсивности голографического поля в этой точке его апертуры. Резкое уменьшение разности максимального и минимального значений интенсивности голографического поля в данной области

синтезированной голограммы, выраженное в интервалах квантования $F$, при увеличении множителя $m$ может быть описано с помощью выражения:

$$F = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{\delta I} = \frac{km}{(1+m)^2}.$$

В результате можно сделать вывод, что при относительно небольших $m$, лежащих в пределах от 1 до нескольких единиц, степень нелинейности голографической записи, а, следовательно, и качество восстановленного изображения будут относительно слабо зависеть от величины множителя $m$ при синтезе голограммы. При дальнейшем увеличении $m$ вероятность потери качества восстанавливаемого изображения вырастет из-за заметного уменьшения величины $F$ и снижения видности страт [13] в плоскости синтеза голограммы. Из проведенного анализа следует, что влияние режима перемодуляции на качество восстановленного изображения при использовании синтезированных голограмм будет значительно меньшим, чем в случае аналоговых голограмм, но также будет определяться динамическим диапазоном интенсивности объектного пучка в плоскости синтеза голограммы. Чем больше динамический диапазон, тем хуже качество восстановленного изображения. В работе [21] показано, что использование объектной волны, сходящейся в центре голограммы, приводит к повышению плотности записи информации об объекте и сокращению регистрируемого диапазона изменений интенсивности голографического поля по сравнению со стандартным случаем синтеза, когда объектная волна гомоцентрична.

Можно предположить, что влияние режима перемодуляции на качество восстановленного в виртуальном пространстве с помощью синтезированных голограмм изображения будет меньшим в случае использования объектной волны, сходящейся в центр голограммы, по сравнению с влиянием, оказываемом при гомоцентрическом ходе лучей. Выполним проверку данной гипотезы методом математического моделирования.

## Методика проведения математического моделирования влияния соотношения интенсивностей опорной и объектной волн на восстановленное изображение

Методика проведения математического моделирования включала в себя синтез рельефно-фазовых голограмм-проекторов двумерных объектов, представляющих собой бинарные амплитудные транспаранты. Синтез осуществлен методом Гюйгенса–Френеля [22], с использованием двух типов объектного пучка: с традиционным для фотолитографии телецентрическим ходом лучей, и с использованием объектного пучка, сходящегося в центре плоскости регистрации голограммы. В общем случае применение такой объектной волны позволяет повысить качество восстанавливаемого изображения и сократить размер голограммы [21].

Результаты синтеза представлены в виде двумерного массива значений интенсивности голографического поля, рассчитанных для эквидистантно расположенных точек апертуры голограммы. Для получения отражательной рельефно-фазовой синтезированной голограммы каждое значение интенсивности массива автоматически пересчитано в пропорциональный ему фазовый набег от 0 до $\pi/2$ (максимальное значение интенсивности соответствует набегу в $\pi/2$, а минимальное — в 0). Далее голограмма подвергнута численному восстановлению в виртуальном пространстве, и полученное изображение сохранено в виде графического файла.

Математическое моделирование процессов синтеза и восстановления голограмм с различным соотношением интенсивностей объектного и опорного пучков проведено в специализированном программном комплексе[1]. Численные параметры синтеза голограмм выбраны в соответствии с требованиями, установленными в работе [23]:

— для пространственного разделения порядков дифракции дискретной голограммы должно выполняться условие, чтобы размер ее пиксела составлял не более 1/4 от размера минимального элемента структуры объекта;
— для обеспечения наложения всей плоской опорной волны на голограмму без экранирования объектом необходимо, чтобы используемая длина волны не превышала величины, равной 2,7 периодов дискретизации голограммы;
— расстояние от плоского тест-объекта до голограммы принято $R_z$ = 20345 нм при рабочей длине волны $\lambda$ = 13,5 нм, которая используется в литографических установках компании ASML, предназначенных для реализации фотолитографического процесса в экстремально коротковолновой ультрафиолетовой области спектра [24];
— размер пиксела голограммы составил 20 × 20 нм, а угол падения опорной волны равен 14°42′;
— размер пиксела тест-объекта 80 × 80 нм, поскольку успешное восстановление изображения возможно только в том случае, когда период дискретизации синтезированной голограммы как минимум в 4 раза меньше периода дискретизации самого объекта.

## Результаты математического моделирования

С целью оценки влияния режима перемодуляции на вид и качество восстановленного изображения выполнен синтез и численное восстановление в виртуальном пространстве голограммы объекта «Уголки» (рис. 3).

Размер объекта 23 × 23 пикселов и представляет совокупность линий шириной от 1 до 3 пикселов. Размер линии креста 1 × 7 пикселов. Из отрезков толщиной в 1 пиксел составлены два ближайших к кресту уголка, расстояние между которыми 1 пиксел. Ширина третьего уголка 2 пиксела, четвертого, самого дальнего от креста, — 3 пиксела. Расстояние между вторым и третьим уголками — 2 пиксела, между третьим и четвертым — 3 пиксела.

[1] Программный комплекс разработан в Университете ИТМО и прошел государственную регистрацию (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013616036 от 25.06.2013).



*Рис. 3*. Объект «Уголки»
*Fig. 3*. Object “Angles”

Синтез голограмм объекта «Уголки» проведен при различных соотношениях интенсивностей опорной и объектной волн: 1:1 (стандартная ситуация в цифровой голографии), 1:2, 1:4, 1:6 и 1:8. Другими словами, рассматривались случаи, когда интенсивность объектной волны превышала интенсивность опорной в 1, 2, 4, 6 и 8 раз. Для каждого случая получено две голограммы, с использованием телецентрического и сходящегося объектного пучков. В результате было синтезировано 10 голограмм, результаты численного восстановления которых представлены в табл. 1.

Сравнение качества изображений, полученных при использовании разной формы представления опорной волны, позволяет оценить влияние размера динамического диапазона голограммы на качество восстанавливаемых изображений в режиме перемодуляции. Оценка качества осуществлена с использованием критерия, численно выражаемого через количество допустимых уровней (градаций) пороговой обработки полученного изображения, при котором оно по распределению интенсивности полностью идентично исходному объекту. Чем больше таких уровней (градаций), тем изображение можно считать более качественным, а значит, при

*Таблица 1*. Восстановленные изображения объектов
*Table 1.* Reconstructed images of the objects

| Соотношение интенсивностей объектного и опорного пучков | Изображение при телецентрическом ходе лучей объектного пучка | Изображение при сходящемся объектном пучке |
|---|---|---|
| 1:1 |  |  |
| 1:2 |  |  |
| 1:4 |  |  |
| 1:6 |  |  |
| 1:8 |  |  |

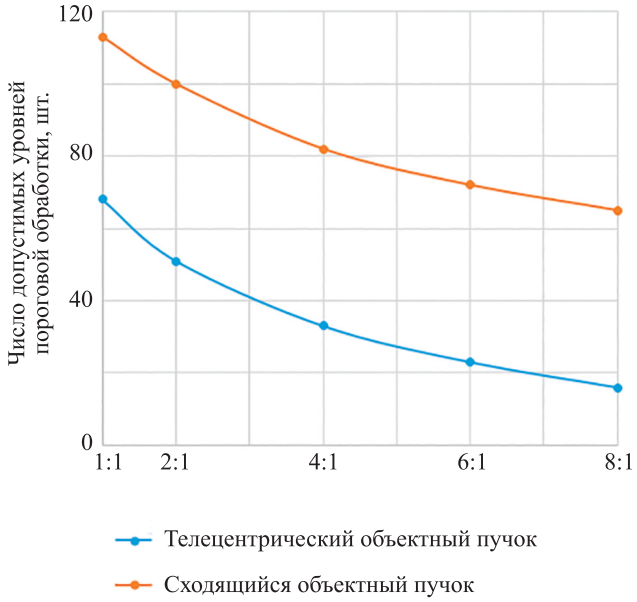



*Рис. 4*. График зависимости числа допустимых уровней пороговой обработки от отношения величин интенсивности объектного и опорного пучков для двух схем хода лучей

*Fig. 4*. Graph of the number of allowable thresholding levels versus the ratio of the intensity values of the object and reference beams for two ray paths

практической реализации фотолитографического процесса с использованием синтезированных голограмм снижаются требования к контрасту фоторезиста и точности подбора экспозиционной дозы [25]. Результаты оценки качества восстановленных изображений с помощью данного критерия (рис. 4) показаны в виде графика зависимости числа допустимых градаций пороговой обработки восстановленных изображений от формы объектного пучка и отношения интенсивностей объектного и опорного пучков.

По полученным результатам видно, что синтез голограмм в режиме перемодуляции приводит к большему снижению качества восстанавливаемого изображения, при снижении интенсивности опорного пучка относительно объектного. При этом качество изображений, восстановленных с помощью голограмм, полученных с использованием сходящегося на голограмме объектного пучка, при совпадении прочих условий синтеза оказывается выше, чем качество изображений, восстановленных при условии использования телецентрического хода объектного пучка.

Как видно из рис. 4, при использовании сходящегося объектного пучка ухудшение качества восстановленного изображения со снижением интенсивности опорного пучка происходит медленнее, чем при использовании телецентрического объектного пучка. Так, при снижении интенсивности опорной волны в 8 раз относительно интенсивности объектной волны, количество допустимых уровней пороговой обработки восстановленного изображения в случае использования сходящегося объектного пучка уменьшится на 42,5 %, а в случае использования телецентрического объектного пучка — на 76,5 %. Это позволяет сделать вывод о том, что величина динамического диапазона оказывает значительное влияние на качество изображений, полученных с помощью голограмм-проекторов, синтезированных в режиме перемодуляции.

Отметим, что в случае физически восстанавливаемых синтезированных голограмм влияние режима перемодуляции на качество восстановленного изображения значительно увеличится за счет нелинейности процесса отображения структуры голограммы в материале носителя.

## Заключение

В работе исследовано влияние соотношения интенсивностей опорной и объектной волн на распределение интенсивности формируемого с их помощью голографического поля для случаев аналоговых и синтезированных голограмм. Показано, что не подвергнутые бинаризации синтезированные голограммы отображаются и восстанавливаются не как полутоновые, а как квантованные голограммы. Интервал квантования определяется интенсивностями объектного и опорного пучков, а также числом отображаемых градаций на голограмме. Установлено, что влияние режима перемодуляции в процессе записи голограмм на качество получаемого изображения при использовании синтезированных голограмм меньше, чем при использования аналоговых. Методом математического моделирования показано, что для синтезированных голограмм это влияние будет минимальным при условии использования при синтезе голограммы объектного пучка, сходящегося в ее центре.

## Литература

1. Maiden A., McWilliam R., Purvis A., Johnson S., Williams G.L., Seed N.L., Ivey P.A. Nonplanar photolithography with computer-generated holograms // Optics Letters. 2005. V. 30. N 11. P. 1300–1302. https://doi.org/10.1364/OL.30.001300
2. Naullenau P.P., Salmassi F., Cullikson E.M., Liddle J.A. Design and fabrication of a highefficiency extreme-ultraviolet binary phase-only computer-generated hologram // Applied Optics. 2007. V. 46. N 14. P. 2581–2585. https://doi.org/10.1364/AO.46.002581
3. Cheng Y.-C., Isoyan A., Wallace J., Khan M., Cerrina F. Extreme ultraviolet holographic lithography: Initial results // Applied Physics Letters. 2007. V. 90. N 2. P. 023116. https://doi.org/10.1063/1.2430774
4. Bay C., Hübner N., Freeman J., Wilkinson T. Maskless photolithography via holographic optical projection // Optics Letters.

## References

1. Maiden A., McWilliam R., Purvis A., Johnson S., Williams G.L., Seed N.L., Ivey P.A. Nonplanar photolithography with computer-generated holograms. *Optics Letters*, 2005, vol. 30, no. 11, pp. 1300–1302. https://doi.org/10.1364/OL.30.001300
2. Naullenau P.P., Salmassi F., Cullikson E.M., Liddle J.A. Design and fabrication of a highefficiency extreme-ultraviolet binary phase-only computer-generated hologram. *Applied Optics*, 2007, vol. 46, no. 14, pp. 2581–2585. https://doi.org/10.1364/AO.46.002581
3. Cheng Y.-C., Isoyan A., Wallace J., Khan M., Cerrina F. Extreme ultraviolet holographic lithography: Initial results. *Applied Physics Letters*, 2007, vol. 90, no. 2, pp. 023116. https://doi.org/10.1063/1.2430774
4. Bay C., Hübner N., Freeman J., Wilkinson T. Maskless photolithography via holographic optical projection. *Optics Letters*,

2010. V. 35. N 13. P. 2230–2232. https://doi.org/10.1364/OL.35.002230
5. Гусев А.И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии. М.: Физматлит, 2007. 416 с.
6. Корешев С.Н., Смородинов Д.С., Фролова М.А. Метод увеличения глубины резкости изображений плоских транспарантов, восстановленных с помощью синтезированных голограмм // Оптический журнал. 2018. Т. 85. № 11. С. 50–57. https://doi.org/10.17586/1023-5086-2018-85-11-50-57
7. Ярославский Л.П., Мерзляков Н.С. Методы цифровой голографии. М.: Наука, 1977. 192 с.
8. Pan W. Multiplane imaging and depth-of-focus extending in digital holography by a single-shot digital hologram // Optics Communications. 2013. V. 286. N 1. P. 117–122. https://doi.org/10.1016/j.optcom.2012.09.013
9. Bianco V., Memmolo P., Leo M., Montresor S., Distante C., Paturzo M., Picart P., Javidi B., Ferraro P. Strategies for reducing speckle noise in digital holography // Light: Science & Applications. 2018. V. 7. N 1. P. 48. https://doi.org/10.1038/s41377-018-0050-9
10. Huang X., Jia Z., Zhou J., Yang J., Kasabov N. Speckle reduction of reconstructions of digital holograms using gamma-correction and filtering // IEEE Access. 2017. V. 6. P. 5227–5235. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2751540
11. Castaneda R., Garcia-Sucerquia J., Doblas A. Speckle noise reduction in coherent imaging systems via hybrid median–mean filter // Optical Engineering. 2021. V. 60. N 12. P. 123107. https://doi.org/10.1117/1.OE.60.12.123107
12. Корешев С.Н., Смородинов Д.С., Никаноров О.В., Громов А.Д. Обеспечение равной интенсивности элементов изображений бинарных объектов, восстанавливаемых с помощью синтезированных голограмм-проекторов // Оптика и спектроскопия. 2013. Т. 114. № 2. С. 318–323. https://doi.org/10.7868/S003040341302013X
13. Кольер Р., Беркхарт К., Лин Л. Оптическая голография. М.: Мир, 1973. 686 с.
14. Hariharan P. Basics of Holography. Cambridge University Press, 2002. 174 p.
15. Jeong T.H. Basic principles and applications of holography // Fundamentals of Photonics. 2008. P. 381–417. https://doi.org/10.1117/3.784938.ch10
16. Seelamantula C.S., Pavillon N., Depeursinge C., Unser M. Zero-order-free image reconstruction in digital holographic microscopy // Proc. of the IEEE International Symposium on Biomedical Imaging: From Nano to Micro (ISBI). 2009. P. 201–204. https://doi.org/10.1109/ISBI.2009.5193018
17. Castañeda R., Hincapie D., Garcia-Sucerquia J. Experimental study of the effects of the ratio of intensities of the reference and object waves on the performance of off-axis digital holography // Optik. 2017. V. 132. P. 274–283. https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2016.12.062
18. Seelamantula C.S., Pavillon N., Depeursinge C., Unser M. Exact complex-wave reconstruction in digital holography // Journal of the Optical Society of America A: Optics and Image Science, and Vision. 2011. V. 28. N 6. P. 983–992. https://doi.org/10.1364/JOSAA.28.000983
19. Su W.-C., Huang C.-Y., Chen J.-Y., Su W.-H. Effect of recording-beam ratio on diffraction efficiency of polarization holographic gratings in dye-doped liquid-crystal films // Optics Letters. 2010. V. 35. N 3. P. 405–407. https://doi.org/10.1364/OL.35.000405
20. Johnson S. Stephen Johnson on Digital Photography. USA, Sebastopol, CA, O'Reilly Media, Inc., 2006. 305 p.
21. Корешев С.Н., Смородинов Д.С., Старовойтов С.О., Фролова М.А. Влияние структуры объектного пучка на качество изображения, восстанавливаемого с помощью синтезированной голограммы-проектора Френеля // Оптический журнал. 2020. Т. 87. № 7. С. 41–48. https://doi.org/10.17586/1023-5086-2020-87-07-41-48
22. Корешев С.Н., Смородинов Д.С., Старовойтов С.О. Влияние метода синтеза голограмм-проекторов и распределения фазы в плоскости объекта на качество восстановленного изображения // Компьютерная оптика. 2020. Т. 44. № 2. С. 203–208. https://doi.org/10.18287/2412-6179-CO-613
23. Корешев С.Н., Смородинов Д.С., Никаноров О.В. Влияние дискретности синтезированных и цифровых голограмм на их изображающие свойства // Компьютерная оптика. 2016. Т. 40. № 6. С. 793–801. https://doi.org/10.18287/2412-6179-2016-40-6-793-801

2010, vol. 35, no. 13, pp. 2230–2232. https://doi.org/10.1364/OL.35.002230
5. Gusev A.I. *Nanomaterials, Nanostructures, Nanotechnologies*. Moscow, Fizmatlit Publ., 2007, 416 p. (in Russian)
6. Koreshev S.N., Smorodinov D.S., Frolova M.A. Method for increasing the depth of field of images of flat transparencies reconstructed using synthesized holograms. *Journal of Optical Technology*, 2018, vol. 85, no. 11, pp. 696–702. https://doi.org/10.1364/JOT.85.000696
7. Jaroslavskij L.P., Merzljakov N.S. *Methods of the Digital Holography*. Moscow, Nauka, 1977, 192 p. (in Russian)
8. Pan W. Multiplane imaging and depth-of-focus extending in digital holography by a single-shot digital hologram. *Optics Communications*, 2013, vol. 286, no. 1, pp. 117–122. https://doi.org/10.1016/j.optcom.2012.09.013
9. Bianco V., Memmolo P., Leo M., Montresor S., Distante C., Paturzo M., Picart P., Javidi B., Ferraro P. Strategies for reducing speckle noise in digital holography. *Light: Science & Applications*, 2018, vol. 7, no. 1, pp. 48. https://doi.org/10.1038/s41377-018-0050-9
10. Huang X., Jia Z., Zhou J., Yang J., Kasabov N. Speckle reduction of reconstructions of digital holograms using gamma-correction and filtering. *IEEE Access*, 2017, vol. 6, pp. 5227–5235. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2751540
11. Castaneda R., Garcia-Sucerquia J., Doblas A. Speckle noise reduction in coherent imaging systems via hybrid median–mean filter. *Optical Engineering*, 2021, vol. 60, no. 12, pp. 123107. https://doi.org/10.1117/1.OE.60.12.123107
12. Koreshev S.N., Smorodinov D.S., Nikanorov O.V., Gromov A.D. Intensity equalization for elements for binary-object images reconstructed using synthesized hologram projectors. *Optics and Spectroscopy*, 2013, vol. 114, no. 2, pp. 288–292. https://doi.org/10.1134/S0030400X13020136
13. Collier R.J., Burckhardt C.B., Lin L.H. *Optical Holography*. New York, NY, Academic Press, 1971.
14. Hariharan P. *Basics of Holography*. Cambridge University Press, 2002, 174 p.
15. Jeong T.H. Basic principles and applications of holography. *Fundamentals of Photonics*, 2008, pp. 381–417. https://doi.org/10.1117/3.784938.ch10
16. Seelamantula C.S., Pavillon N., Depeursinge C., Unser M. Zero-order-free image reconstruction in digital holographic microscopy. *Proc. of the IEEE International Symposium on Biomedical Imaging: From Nano to Micro (ISBI)*, 2009, pp. 201–204. https://doi.org/10.1109/ISBI.2009.5193018
17. Castañeda R., Hincapie D., Garcia-Sucerquia J. Experimental study of the effects of the ratio of intensities of the reference and object waves on the performance of off-axis digital holography. *Optik*, 2017, vol. 132, pp. 274–283. https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2016.12.062
18. Seelamantula C.S., Pavillon N., Depeursinge C., Unser M. Exact complex-wave reconstruction in digital holography. *Journal of the Optical Society of America A: Optics and Image Science, and Vision,* 2011, vol. 28, no. 6, pp. 983–992. https://doi.org/10.1364/JOSAA.28.000983
19. Su W.-C., Huang C.-Y., Chen J.-Y., Su W.-H. Effect of recording-beam ratio on diffraction efficiency of polarization holographic gratings in dye-doped liquid-crystal films. *Optics Letters*, 2010, vol. 35, no. 3, pp. 405–407. https://doi.org/10.1364/OL.35.000405
20. Johnson S. *Stephen Johnson on Digital Photography*. USA, Sebastopol, CA, O'Reilly Media, Inc., 2006, 305 p.
21. Koreshev S.N., Smorodinov D.S., Starovoitov S.O., Frolova M.A. Influence of the structure of the object beam on the quality of images reconstructed using a synthesized Fresnel hologram-projector. *Journal of Optical Technology*, 2020, vol. 87, no. 7, pp. 417–421. https://doi.org/10.1364/JOT.87.000417
22. Koreshev S.N., Smorodinov D.S., Starovoitov S.O. Influence of computer-generated holograms synthesis method and phase distribution in the object plane on the quality of the reconstructed image. *Computer Optics*, 2020, vol. 44, no. 2, pp. 203–208. (in Russian). https://doi.org/10.18287/2412-6179-CO-613
23. Koreshev S.N., Smorodinov D.S., Nikanorov O.V. Influence of the discreteness of synthetic and digital holograms on their imaging properties. *Computer Optics*, 2016, vol. 40, no. 6, pp. 793–801. (in Russian). https://doi.org/10.18287/2412-6179-2016-40-6-793-801
24. Fu N., Liu Y., Ma X., Chen Z. EUV lithography: State-of-the-art review. *Journal of Microelectronic Manufacturing*, 2019, vol. 2, pp. 19020202. https://doi.org/10.33079/jomm.19020202

24. Fu N., Liu Y., Ma X., Chen Z. EUV lithography: State-of-the-art review // Journal of Microelectronic Manufacturing. 2019. V. 2. P. 19020202. https://doi.org/10.33079/jomm.19020202
25. Ежова К.В. Моделирование и обработка изображений: учебное пособие. СПб.: НИУ ИТМО, 2011. 93 с.

25. Ezhova K.V. *Image Modeling and Processing*. St. Petersburg, NIU ITMO, 2011, 93 p. (in Russian)

**Авторы**

**Корешев Сергей Николаевич** — доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник, Филиал АО «Корпорация «Комета» – «Научно-проектный центр оптоэлектронных комплексов наблюдения», Санкт-Петербург, 194021, Российская Федерация, SC 6603811394, https://orcid.org/0000-0002-8728-6122, koreshev@list.ru

**Старовойтов Сергей Олегович** — аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация; ведущий технический писатель, Санкт-Петербургский информационно-аналитический центр, Санкт-Петербург, 191040, Российская Федерация, SC 57211837718, https://orcid.org/0000-0003-4429-7929, s.starovoitov95@gmail.com

**Authors**

**Sergey N. Koreshev** — D. Sc. (Eng.), Professor, Leading Researcher, Branch of JSC Corporation “Kometa” – “Scientific and design center of optoelectronic surveillance systems”, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation, SC 6603811394, https://orcid.org/0000-0002-8728-6122, koreshev@list.ru

**Sergei O. Starovoitov** — PhD student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation; Leading Technical Writer, Saint Petersburg State Unitary Enterprise “Saint Petersburg Information and Analytical Center”, Saint Petersburg, 191040, Russian Federation, SC 57211837718, https://orcid.org/0000-0003-4429-7929, s.starovoitov95@gmail.com

*Статья поступила в редакцию 04.02.2022*
*Одобрена после рецензирования 02.04.2022*
*Принята к печати 19.05.2022*

*Received 04.02.2022*
*Approved after reviewing 02.04.2022*
*Accepted 19.05.2022*

Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ
май–июнь 2022 Том 22 № 3 http://ntv.ifmo.ru/
SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL OF INFORMATION TECHNOLOGIES, MECHANICS AND OPTICS
May–June 2022 Vol. 22 No 3 http://ntv.ifmo.ru/en/
ISSN 2226-1494 (print) ISSN 2500-0373 (online)
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК УНИВЕРСИТЕТ ИТМО
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ

doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-3-442-449
УДК 535.08

# Высокоточный волоконно-оптический датчик температуры на основе интерферометра Фабри–Перо с отражающими тонкопленочными многослойными структурами

**Янина Дмитриевна Моор[1]✉, Кирилл Александрович Коннов[2], Михаил Юрьевич Плотников[3], Антон Валерьевич Волков[4], Сергей Владимирович Варжель[5], Дмитрий Александрович Коннов[6], Владимир Евгеньевич Стригалев[7]**

[1,2,3,4,5,6,7] Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

[1] yanoti@yandex.ru✉, https://orcid.org/0000-0002-1624-2659
[2] kirillkonnov1991@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-8888-3527
[3] plotnikov-michael@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0003-2506-0379
[4] avvolkov9223@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-7988-5854
[5] Vsv187@gmail.ru, https://orcid.org/0000-0002-3120-8109
[6] dakonnov@itmo.ru, https://orcid.org/0000-0002-8256-973X
[7] vstrglv@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-7151-9235

**Аннотация**

**Предмет исследования.** Предложен вариант реализации волоконно-оптического датчика температуры на основе интерферометра Фабри–Перо и схема опроса экспериментального образца датчика. Предложенное решение позволяет не применять дорогостоящие спектральные измерительные устройства (анализатор спектра, интеррогатор). Определены область свободной дисперсии и фазовая чувствительность разработанного интерферометра Фабри–Перо в диапазоне температур от 20 °C до 590 °C. Рассчитана точность измерения температуры окружающей среды. Выполнена оценка долговременной стабильности измерительной установки при комнатной температуре. Зарегистрирован сдвиг фазы интерферометра Фабри–Перо при изменении температуры. **Метод.** Конструкция интерферометра Фабри–Перо реализована с применением отражающих тонкопленочных многослойных структур, полученных путем поэтапного электронно-лучевого напыления в вакууме на полированные торцевые сколы оптического волокна. Метод опроса интерферометра основан на применении вертикально-излучающего лазера оптического диапазона (VCSEL), работающего в импульсном режиме. Принцип регистрации сдвига фазы интерферометра при изменении температуры использован для выполнения вспомогательной модуляции излучения лазера по длине волны за счет периодического изменения длительности оптических импульсов. Вспомогательная модуляция позволяет получить в сигнале интерферометра дополнительные гармонические составляющие, которые применяются при гомодинной демодуляции и восстановлении сигнала сдвига фазы интерферометра, пропорционального изменению оптической разности хода лучей между зеркалами интерферометра. **Основные результаты.** Конструкция высокотемпературного датчика реализована на основе интерферометра Фабри–Перо, отражающие зеркала которого представляют собой пять чередующихся слоев тонких пленок диоксида титана и оксида алюминия. По результатам температурного эксперимента сделан вывод, что увеличение температуры окружающей среды приводит к уменьшению области свободной дисперсии интерферометра Фабри–Перо. Полученные результаты соответствуют теоретическим данным. Показано, что фазовая чувствительность интерферометра к изменению температуры составляет 0,94 рад/К. Точность измерений температуры по уровню 3σ равна 0,017 К. **Практическая значимость.** Результаты исследования могут иметь важное значение при создании систем мониторинга температур свыше 300 °C. Применение подобного интерферометра позволит проводить высокоточные относительные измерения температуры.

**Ключевые слова**

интерферометр Фабри–Перо, высокотемпературный датчик, область свободной дисперсии, фазовая чувствительность, сигнал сдвига фазы, чувствительность интерферометра

© Моор Я.Д., Коннов К.А., Плотников М.Ю., Волков А.В., Варжель С.В., Коннов Д.А., Стригалев В.Е., 2022

**Благодарности**
Работа выполнена при финансовой поддержке программы «Приоритет 2030».

**Ссылка для цитирования:** Моор Я.Д., Коннов К.А., Плотников М.Ю., Волков А.В., Варжель С.В., Коннов Д.А., Стригалев В.Е. Высокоточный волоконно-оптический датчик температуры на основе интерферометра Фабри–Перо с отражающими тонкопленочными многослойными структурами // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2022. Т. 22, № 3. С. 442–449. doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-3-442-449

# High-precision fiber-optic temperature sensor based on Fabry-Perot interferometer with reflective thin-film multilayer structures

**Ianina D. Moor[1]✉, Kirill A. Konnov[2], Michael Yu. Plotnikov[3], Anton V. Volkov[4], Sergey V. Varzhel[5], Dmitriy A. Konnov[6], Vladimir E. Strigalev[7]**

[1,2,3,4,5,6,7] ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

[1] yanoti@yandex.ru✉, https://orcid.org/0000-0002-1624-2659
[2] kirillkonnov1991@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-8888-3527
[3] plotnikov-michael@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0003-2506-0379
[4] avvolkov9223@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-7988-5854
[5] Vsv187@gmail.ru, https://orcid.org/0000-0002-3120-8109
[6] dakonnov@itmo.ru, https://orcid.org/0000-0002-8256-973X
[7] vstrglv@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-7151-9235

**Annotation**
An embodiment of a fiber-optic temperature sensor based on a Fabry-Perot interferometer and a scheme for interrogating an experimental sample of the sensor are proposed. The proposed solution makes it possible not to use expensive spectral measuring devices (spectrum analyzer, interrogator). The region of free dispersion and the phase sensitivity of the developed Fabry-Perot interferometer were determined in the temperature range from 20 °C to 590 °C. The accuracy of measuring the ambient temperature is calculated. The long-term stability of the measuring setup at room temperature has been evaluated. The phase shift of the Fabry-Perot interferometer with temperature change was registered. The design of the Fabry-Perot interferometer is implemented using reflective thin-film multilayer structures obtained by stage-by-stage electron-beam deposition in vacuum on polished end cleavages of an optical fiber. The interferometer interrogation method is based on the use of a vertical-cavity surface-emitting laser (VCSEL) operating in a pulsed mode. The principle of registering the phase shift of the interferometer with a change in temperature is based on the use of auxiliary modulation of laser radiation along the wavelength due to modulation (periodic change) of the duration of optical pulses. Auxiliary modulation makes it possible to obtain additional harmonic components in the interferometer signal, which are further used in homodyne demodulation to restore the interferometer phase shift signal proportional to the change in the optical path difference between the interferometer mirrors. The design of the high-temperature sensor is based on a Fabry-Perot interferometer the reflecting mirrors of which are five alternating layers of thin films of $TiO_2$ and $Al_2O_3$. Based on the results of the temperature experiment, it was concluded that an increase in the ambient temperature leads to a decrease in the free dispersion region of the Fabry-Perot interferometer. The conclusion made is consistent with the theoretical data. According to the results of the experiment, it is shown that the phase sensitivity of the interferometer to temperature changes is 0.94 rad/K. The accuracy of temperature measurements at the 3σ level was 0.017 K. The results of the study may be of great importance in creating systems for monitoring temperatures above 300 °C. The use of such an interferometer makes it possible to carry out high-precision relative temperature measurements.

**Keywords**
Fabry-Perot interferometer, high temperature sensor, free spectral range, phase sensitivity, phase drift signal, interferometer sensitivity

**Acknowledgements**
The work is financially supported by Priority 2030 program.

**For citation:** Moor Ia.D., Konnov K.A., Plotnikov M.Yu., Volkov A.V., Varzhel S.V., Konnov D.A., Strigalev V.E. High-precision fiber-optic temperature sensor based on Fabry-Perot interferometer with reflective thin-film multilayer structures. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2022, vol. 22, no. 3, pp. 442–449 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-3-442-449

## Введение

В настоящее время во многих отраслях техники и промышленности существует тенденция перехода на волоконно-оптические датчики, которые обладают рядом преимуществ. Такие датчики устойчивы к электромагнитным помехам, имеют малый размер и вес, позволяют работать во взрывоопасных средах, могут производить опрос данных удаленных объектов и имеют высокую чувствительность. Эта тенденция актуальна и для области температурных измерений.

Например, в качестве одного из вариантов волоконно-оптического датчика температуры выступают волоконные решетки Брэгга. Известно, что у решеток первого типа имеется температурное ограничение, предел их измерения составляет 300 °C [1]. Решетки второго типа могут работать при температурах до 900 °C [2] и даже до 1200 °C [3], но имеют сложности в процессе записи и обладают низкой механической прочностью. Формирование датчика температур свыше 300 °C возможно на основе чувствительного элемента в виде интерферометра Фабри–Перо (ИФП), который приме-

няется в волоконно-оптической измерительной технике в качестве датчика различных физических величин [4–8]. В волоконно-оптическом ИФП интерференция образуется за счет использования пары отражающих зеркал, а размер чувствительного элемента формируемого датчика сопоставим с диаметром оптического волокна. В литературе описаны различные способы создания волоконно-оптического ИФП, наиболее интересными являются разработки с использованием сварного соединения [9–12] и волокна с высоким содержанием оксидов металлов в сердцевине [13].

В настоящей работе реализация конструкции волоконно-оптического ИФП базируется на методе напыления многослойного диэлектрического слоя из диоксида титана ($TiO_2$) и оксида алюминия ($Al_2O_3$) на поверхность отполированного скола оптического волокна. Отметим, что данная методика описана во многих научных работах с подтверждением измеренных температурных параметров на практике. Например, в работе [14] показан расчет параметров ИФП с многослойными диэлектрическими зеркалами из $TiO_2$. В патенте [15] представлены два одинаковых ИФП, отражательные зеркала которых сформированы с применением $TiO_2$ в отрезке одномодового оптического волокна. В работе [16] присутствуют числовые значения при измерении долговременной стабильности ИФП. В работе [17] авторы оценили отражательную способность выбранных диэлектрических тонких пленок для формирования полости ИФП. Были выполнены оценка и сравнение спектральных коэффициентов отражения и пропускания диэлектрических пленок из $TiO_2$ и $Al_2O_3$ толщиной от 30 нм до 220 нм. Пленки из $TiO_2$ признаны наиболее перспективными по отражательной способности для формирования ИФП. Чтобы проверить и пояснить результаты моделирования, пленки из $TiO_2$ толщиной 80 нм были нанесены на кончик одномодового оптического волокна путем осаждения атомного слоя. Толщина, структура и химические свойства пленок известны. Изучена способность выбранных пленок изменять отражательную способность полости Фабри–Перо, обеспечивать защиту волокон от агрессивных сред и создавать многорезонаторные интерферометрические датчики на основе ИФП.

Активное использование $TiO_2$ в научных работах показывает всю значимость данного химического элемента при создании отражательных зеркал волоконного ИФП для измерения высоких температур. Однако в большинстве научных работ не рассмотрен вопрос чувствительности измерений ИФП в связи с тем, что представленная система опроса интерферометра имеет высокую стоимость и малую скорость работы.

В [18] продемонстрирован волоконно-оптический высокотемпературный датчик на основе ИФП, диэлектрические зеркала которого сформированы из материалов $ZrO_2/Al_2O_3/ZrO_2$ толщиной 283, 1396, 283 нм соответственно. Чувствительность ИФП при изменении температуры окружающей среды от 25 °C до 750 °C составила $5.4 \cdot 10^{-3}$ нм/°C, что в пересчете в радианы – около 68 мкрад/°C (при использованной длине волны $\lambda = 500$ нм). Данный результат существенно меньше значения чувствительности, полученной в настоящей работе.

Цель работы — разработка компактного волоконно-оптического датчика на основе ИФП, обладающего высокой температурной чувствительностью и работающего при температурах свыше 300 °C. Датчик не требует подведения электропитания к чувствительному элементу и работоспособен в условиях агрессивной окружающей среды и имеет малые массогабаритные параметры. Применение представленной схемы опроса ИФП позволит исключить использование дорогостоящих спектральных измерительных устройств (анализатора спектра, интеррогатора) и провести опрос датчика на большой частоте.

## Принцип работы и изготовление чувствительного элемента

**Выбор материалов.** По результатам теоретического анализа, литературного обзора и математического моделирования различных материалов и их толщин для формирования диэлектрических зеркал на торце волокна было решено использовать пленки из $Al_2O_3$ и $TiO_2$.

Для увеличения механической прочности волоконно-оптического датчика температуры использованы оптические волокна с металлическим покрытием, которые обладают большим сопротивлением усталости по сравнению с негерметичными и стандартными волокнами с полимерным покрытием. Волокна с металлическим покрытием используются в широком спектральном диапазоне и способны сохранять оптические и механические свойства в температурном диапазоне от минус 196 °C до плюс 600 °C[1]. В качестве основы ИФП выбрано одномодовое оптическое волокно в медной оболочке (Cu) производства ООО «Инновационное предприятие «НЦВО–Фотоника».

Численное моделирование и сборка интерферометра Фабри–Перо. С учетом подобранных материалов и желаемого коэффициента отражения рассчитаны толщины напыляемых слоев и их необходимое количество. В работе представлена конструкция диэлектрической структуры (рис. 1), и показан рассчитанный спектр отражения диэлектрического зеркала в среде Essential Macleod (рис. 2) для указанных (рис. 1) толщин напыляемых оксидов.

Сформирован волоконно-оптический ИФП (рис. 3), который реализован на основе одномодового оптического волокна (диаметр кварцевой оболочки 125 мкм), двух диэлектрических зеркал, кварцевого капилляра и высокотемпературного клея. Диэлектрические зеркала получены путем поэтапного электронно-лучевого напыления в вакууме тонких пленок $TiO_2$ и $Al_2O_3$ (пять слоев) на полированные торцевые сколы оптического волокна. Предполагалось получить коэффициент отражения зеркал в соответствии с расчетом около 40 % на длине волны 1550 нм, однако, из-за сложности точного контроля процесса напыления диэлектрических слоев зеркала, фактический коэффициент отражения соста-

[1] Официальный сайт инновационного предприятия «НЦВО-Фотоника» [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://forc-photonics.ru/ru/fibers_and_cables/Cu_coated_fibers/1/36/ (дата обращения: 25.03.2022).

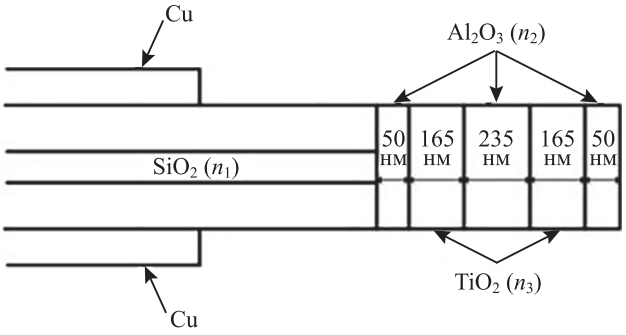



*Рис. 1*. Схематическое изображение многослойного диэлектрического зеркала.
Показатели преломления: $n_1$ — сердцевины оптического волокна ($SiO_2$), $n_2$ — $Al_2O_3$ и $n_3$ — $TiO_2$

*Fig. 1*. Schematic representation of a multilayer dielectric mirror.
Refractive indices: $n_1$ is cores of optical fiber ($SiO_2$), $n_2$ is $Al_2O_3$, and $n_3$ is of $TiO_2$

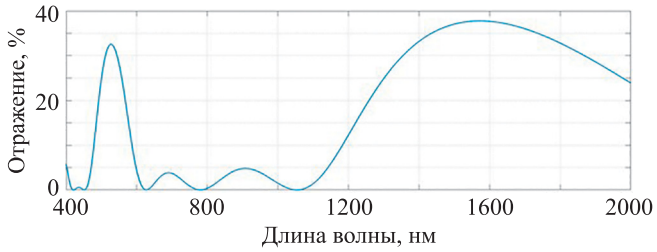



*Рис. 2*. Рассчитанный спектр отражения диэлектрического зеркала

*Fig. 2*. Calculated reflectance spectrum of a dielectric mirror

вил примерно 20 % (рис. 3). Расчетное значение области свободной дисперсии (FSR) ИФП в среде Essential Macleod при температуре $t$ = 20 °C и базе ИФП $l$ = 8 мм составило 0,1034 нм. Экспериментальное значение FSR ИФП — 0,0959 нм.

## Результаты эксперимента

В рамках работы выполнено два типа температурных исследований. Первый тип эксперимента направлен на определение области свободной дисперсии,

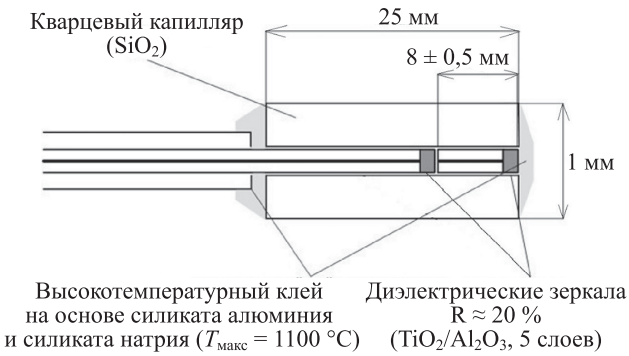



*Рис. 3*. Схематическое изображение интерферометра Фабри–Перо

*Fig. 3*. Schematic representation of the Fabry-Perot interferometer

второй — на определение величины фазовой чувствительности датчика к температуре в диапазоне от 20 °C до 590 °C.

**Определение области свободной дисперсии волоконно-оптического интерферометра Фабри–Перо.** Для регистрации спектральных характеристик волоконно-оптического ИФП проведены лабораторные испытания с использованием установки, которая состоит из: оптического анализатора спектра (Yokogawa AQ6370C), широкополосного источника излучения (Thorlabs S5FC1005S), Y-ответвителя (50/50), волоконно-оптического ИФП, ноутбука. Для определения работоспособности сформированного датчика проведено три температурных цикла «нагрев/охлаждение» в диапазоне температур от 20 °C до 590 °C с шагом 30 °C. На основе полученных данных вычислена область свободной дисперсии ИФП путем усреднения трех измерений спектра отражения в диапазоне от 1559 нм до 1569 нм. Ширина диапазона регистрации спектров отражения интерферометра выбрана в соответствии с равномерностью участка спектра широкополосного источника излучения. На основе полученных данных построена зависимость области свободной дисперсии волоконно-оптического ИФП от температуры. Результаты нагрева и охлаждения представлены на рис. 4.

Расчет области свободной дисперсии определим по формуле

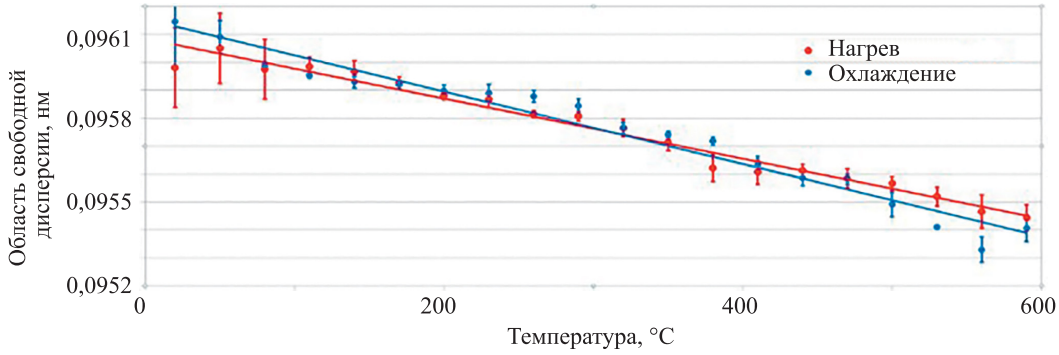



*Рис. 4*. Графики зависимости области свободной дисперсии от температуры при охлаждении и нагреве

*Fig. 4*. Graphs of the dependence of the free dispersion area vs. temperature during cooling and heating

$$FSR = \frac{c}{2ln_{eff}}, \quad (1)$$

где $c$ — скорость света в вакууме; $l$ — толщина ИФП; $n_{eff}$ — эффективный показатель преломления волноводной моды.

На основании полученных зависимостей (1) можно сделать вывод, что увеличение температуры окружающей среды приводит к уменьшению области свободной дисперсии ИФП, что соответствует теоретическим данным. Следовательно, данный образец можно использовать для регистрации температуры окружающей среды.

**Определение фазовой чувствительности волоконно-оптического интерферометра Фабри–Перо к температуре.** Для получения сигнала сдвига фазы ИФП в зависимости от температуры использован метод опроса с применением частотно-импульсной модуляции вертикально-излучающего лазера (VCSEL) [19–21]. Под фазой интерферометра понимается разность фаз между оптическими лучами, отраженными от зеркал ИФП. Разность фаз, приобретаемая за двойной проход оптического излучения между зеркалами, пропорциональна удвоенной длине оптического пути. Под сдвигом фаз понимается сдвиг разности фаз, который может привести к изменению показателя преломления среды и/или расстояния между зеркалами под действием температуры.

Принцип регистрации сдвига фазы интерферометра под действием температуры основан на использовании вспомогательной модуляции VCSEL по длине волны за счет периодического изменения длительности оптических импульсов (рис. 5, *a*). Вспомогательная модуляция VCSEL позволяет получить в интерференционном сигнале интерферометра дополнительные гармонические составляющие, которые далее используются в алгоритме гомодинной демодуляции для восстановления сигнала сдвига фазы интерферометра, пропорционального изменению оптической разности хода лучей между зеркалами интерферометра. Схема проведения измерений приведена на рис. 5, *b*.

ИФП опрошен с помощью оптических импульсов переменной длительности 200–350 нс, посылаемых от VCSEL с частотой 1 МГц. В представленной схеме оптические импульсы последовательно отражаются от зеркал ИФП и перекрываются по времени, формируя интерференционные импульсы переменной длительности, попадающие на фотоприемник через оптический циркулятор. При этом сдвиг длины волны VCSEL прямо пропорционален изменению длительности оптических импульсов в пределах изменения длительности, используемого в данном эксперименте [19, 20]. Таким образом, может быть сформирован вспомогательный фазовый сигнал с интерферометра, пропорциональный оптической разности хода лучей между зеркалами ИФП в соответствии со следующим выражением:

$$\varphi(t) = \frac{2\pi n\Delta L}{\lambda^2}\Delta\lambda(t),$$

где $n\Delta L$ — оптическая разность хода; $\lambda$ — центральная длина волны источника оптического излучения; $\Delta\lambda(t)$ — заданный закон изменения длины волны источника оптического излучения, определяемый характером изменения длительности оптических импульсов.

Для опроса ИФП предложено использовать периодический закон изменения длины волны оптических импульсов вида:

$$\Delta\lambda(t) = \Delta\lambda_{max}\cos(2\pi f_m t),$$

где $f_m$ — частота модуляции (50 кГц); $\Delta\lambda_{max}$ — максимальная амплитуда изменения длины волны VCSEL.

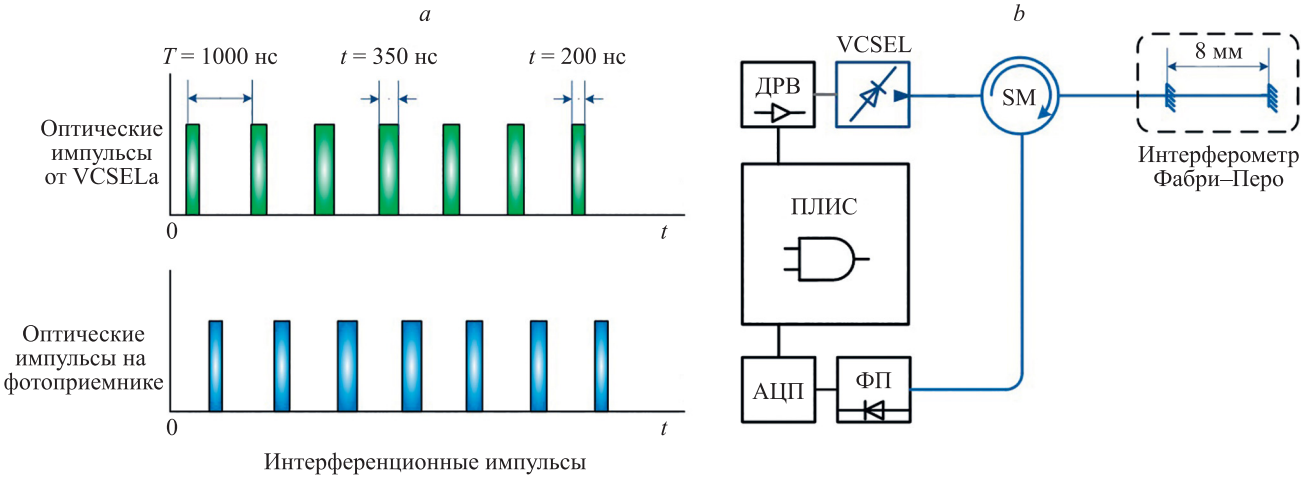



*Рис. 5*. Порядок опроса датчика температуры на основе волоконно-оптического интерферометра Фабри–Перо (*a*) и схема проведения эксперимента (*b*).

ДРВ — драйвер (источник питания), ПЛИС — программируемая логическая интегральная схема, АЦП — аналогово-цифровой преобразователь, ФП — фотоприемник, SM — циркулятор на одномодовом оптическом волокне

*Fig. 5*. The procedure for polling a temperature sensor based on a fiber-optic Fabry-Perot interferometer (*a*) and the scheme of the experiment (*b*).

ДРВ is a driver (power source); ПЛИС is a programmable logic integrated circuit; АЦП is an analog-to-digital converter; ФП is photoelectric detector; SM is circulator on a single-mode optical fiber

Подобная вспомогательная модуляция VCSEL позволяет получить в интерференционном сигнале ИФП дополнительные гармонические составляющие, которые будут использованы в алгоритме гомодинной демодуляции [21–23] для восстановления сигнала сдвига фазы интерферометра.

При использовании выбранного режима модуляции VCSEL (2), (3) на фотоприемнике (при условии двулучевой интерференции) будет формироваться интерференционный сигнал, в котором присутствует сдвиг фазы, обусловленный тепловыми воздействиями. Сигнал сдвига фазы способен точно отслеживать изменения температуры, но не привязан к ее абсолютным значениям, так как показывает некоторое относительное изменение разности фаз в интерферометре относительно момента включения схемы.

Теоретический расчет фазовой чувствительности ИФП к температуре (приращение сдвига фаз при изменении температуры на один градус) можно произвести по формуле [24]:

$$\frac{\Delta\varphi}{\Delta T} = \frac{4\pi}{\lambda}\left(n\frac{dL}{dT} + L\frac{dn}{dT}\right), \quad (4)$$

где $\lambda = 1550$ нм — длина волны источника оптического излучения; $n = 1{,}45$ — показатель преломления оптического волокна; $L = 0{,}008$ м — длина интерферометра; $dL/dT = L \cdot k$, где $k = 0{,}55 \cdot 10^{-6}$ 1/К — температурный коэффициент линейного теплового расширения оптического волокна, $dn/dT = 1{,}09 \cdot 10^{-5}$ 1/К — термооптический коэффициент оптического волокна [25]. В результате теоретического расчета по формуле (4) получим значение фазовой чувствительности интерферометра равное 0,76 рад/К.

Полученный в ходе эксперимента сигнал сдвига фазы интерферометра представлен на рис. 6. ИФП предварительно нагревался в печи до температуры 590 °С, после чего печь выключалась. Сигнал (рис. 6) демонстрирует процесс остывания интерферометра от температуры 530 °С до 110 °С.

Результаты, полученные в ходе данного эксперимента (рис. 6), позволили оценить реальную фазовую чувствительность ИФП к изменению температуры. Функциональное устройство используемой печи не позволило осуществить запись значений температуры в файлы данных, поэтому для расчета чувствительности интерферометра использованы крайние значения температуры – при выключении нагрева и непосредственно в конце записи. Они фиксировались вручную. В результате отношение разности значений сдвига фаз к разности температур позволило оценить чувствительность интерферометра в 0,94 рад/К. Таким образом, практические результаты оценки фазовой чувствительности ИФП оказались близки к расчетным значениям.

Среднеквадратичный уровень собственных шумов системы, измеренный в отсутствие температурного воздействия по выборке длительностью 10 с без усреднения, составил 0,0054 рад. Таким образом, минимально обнаружимое изменение температуры по уровню 3σ равно 0,017 К.

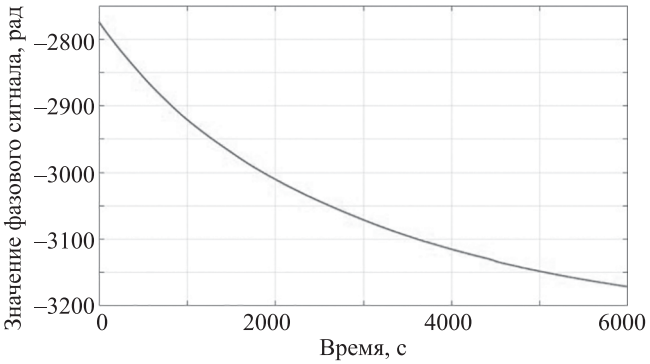



*Рис. 6*. Сигнал сдвига фазы интерферометра при его остывании от 530 °С до 110 °С

*Fig. 6*. Interferometer phase shift signal during its cooling from 530 °C down to 110 °C

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о возможности применения разработанного ИФП для регистрации малых изменений температуры.

**Заключение**

В работе предложена методика формирования волоконно-оптического интерферометра Фабри–Перо и собрана его рабочая конструкция. Проведено математическое моделирование спектров отражения зеркал интерферометра и спектра отражения разработанного интерферометра. Расчет спектров отражения произведен в среде Essential Macleod.

По результатам температурных испытаний сформированный интерферометр Фабри–Перо оказался работоспособным для определения изменения температуры до 590 °С. В работе представлены результаты температурных испытаний разработанного датчика, получены спектральные характеристики образца интерферометра при температурах от 20 °С до 590 °С. По результатам эксперимента сделан вывод, что увеличение температуры окружающей среды приводит к уменьшению области свободной дисперсии интерферометра Фабри–Перо, что соответствует теоретическим данным.

Эксперимент, направленный на определение фазовой чувствительности, показал, что исследованный волоконно-оптический интерферометр Фабри–Перо может использоваться как чувствительный датчик температуры. Фазовая чувствительность интерферометра к температуре, согласно расчетным данным, составила 0,76 рад/К, согласно практическим данным — 0,94 рад/К. Практические результаты оценки фазовой чувствительности интерферометра Фабри–Перо оказались близки к расчетным значениям. Согласно оценке точности измерений минимально обнаружимое изменение температуры по уровню 3σ составило 0,017 К для сигнала сдвига фазы.

**Литература**

1. Kashyap R. Fiber Bragg Gratings. San Diego, CA: Academic Press, 1999. 478 p.
2. Мешковский И.К., Варжель С.В., Беликин М.Н., Куликов А.В., Брунов В.С. Термический отжиг решеток Брэгга при изготовлении волоконно-оптических фазовых интерферометрических датчиков // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2013. Т. 56. № 5. С. 91–93.
3. Liao C.R., Wang D.N. Review of femtosecond laser fabricated fiber Bragg gratings for high temperature sensing // Photonic Sensors. 2013. V. 3. N 2. P. 97–101. https://doi.org/10.1007/s13320-012-0060-9
4. Минкин А.М., Созонов Н.С., Фадеев К.М., Шевцов Д.И. Миниатюрный волоконно-оптический датчик давления на основе интерферометра Фабри-Перо // II Всероссийская конференции «Оптическая рефлектометрия – 2018»: сборник тезисов докладов. 2018. С. 86–89.
5. Pratt D.J. Optical wavelength sensor: Patent PCT WO1995020144A1. 1995.
6. Egorova O.N., Vasil'ev S.A., Likhachev I.G., Sverchkov S.E., Galagan B.I., Denker B.I., Semjonov S.L., Pustovoi V.I. A Fabry–Perot interferometer formed in the core of a composite optical fibre heavily doped with phosphorus oxide // Quantum Electronics. 2019. V. 49. N 12. P. 1140–1144. https://doi.org/10.1070/QEL17133
7. Huang C., Xie W., Lee D., Qi C., Yang M., Wang M., Tang J. Optical fiber humidity sensor with porous $TiO_2/SiO_2/TiO_2$ coatings on fiber tip // IEEE Photonics Technology Letters. 2015. V. 27. N 14. P. 1495–1498. https://doi.org/10.1109/LPT.2015.2426726
8. Агафонова Д.С. Волоконно-оптический датчик температуры. Патент RU155334U1. Бюл. 2015. № 28.
9. Egorova O.N., Semjonov S.L., Velmiskin V.V., Yatsenko Yu.P., Sverchkov S.E., Galagan B.I., Denker B.I., Dianov E.M. Phosphate-core silica-clad Er/Yb-doped optical fiber and cladding pumped laser // Optics Express. 2014. V. 22. N 7. P. 7632–7637. https://doi.org/10.1364/OE.22.007632
10. Duan D.W., Rao Y., Hou Y.-S., Zhu T. Microbubble based fiber-optic Fabry-Perot interferometer formed by fusion splicing single-mode fibers for strain measurement // Applied Optics. 2012. V. 51. N 8. P. 1033–1036. https://doi.org/10.1364/AO.51.001033
11. Machavaram V.R., Badcock R.A., Fernando G.F. Fabrication of intrinsic fibre Fabry-Perot sensors in silica fibres using hydrofluoric acid etching // Sensors and Actuators, A: Physical. 2007. V. 138. P. 248–260. https://doi.org/10.1016/j.sna.2007.04.007
12. Liu S., Wang Y., Liao C., Wang G., Li Z., Wang Q., Zhou J., Yang K., Zhong X., Zhao J., Tang J. High-sensitivity strain sensor based on in-fiber improved Fabry–Perot interferometer // Optics Letters. 2014. V. 39. N 7. P. 2121–2124. https://doi.org/10.1364/OL.39.002121
13. Ma Z., Pang F., Liu H., Chen Z., Wang T. Air microcavity formed in sapphire-derived fiber for high temperature sensing // Proc. of the 26th International Conference on Optical Fiber Sensors. 2018. P. WF48. https://doi.org/10.1364/OFS.2018.WF48
14. Терентьев В.С., Симонов В.А. Метод моделирования асимметричного зеркала для дифракционного отражательного интерферометра в одномодовом волокне // Прикладная фотоника. 2017. Т. 4. № 2. С. 107–120.
15. Тертышник А.Д., Волков П.В., Горюнов А.В., Лукьянов А.Ю. Волоконно-оптический интерференционный датчик температуры. Патент RU2466366C1. Бюл. 2012. № 31.
16. Bennett J.M., Pelletier E., Albrand G., Borgogno J.P., Lazarides B., Carniglia C.K., Schmell R.A., Allen T.H., Tuttle-Hart T., Guenther K.H., Saxer A. Comparison of the properties of titanium dioxide films prepared by various techniques // Applied Optics. 1989. V. 28. N 16. P. 3303–3317. https://doi.org/10.1364/AO.28.003303
17. Hirsch M., Majchrowicz D., Wierzba P., Weber M., Bechelany M., Jędrzejewska-Szczerska M. Low-coherence interferometric fiber-optic sensors with potential applications as biosensors // Sensors. 2017. V. 17. N 2. P. 261. https://doi.org/10.3390/s17020261
18. Lee D., Yang M., Huang C., Dai J. Optical fiber high-temperature sensor based on dielectric films extrinsic Fabry–Pérot cavity // IEEE Photonics Technology Letters. 2014. V. 26. N 21. P. 2107–2110. https://doi.org/10.1109/LPT.2014.2346622
19. Киреенков А.Ю., Алейник А.С., Плотников М.Ю., Мехреньгин М.В. Способ частотно-импульсной модуляции полупроводникового лазерного источника оптического излучения для опроса оптических интерферометрических датчиков. Патент RU2646420C1. Бюл. 2018. № 7.

**References**

1. Kashyap R. *Fiber Bragg Gratings*. San Diego, CA, Academic Press, 1999, 478 p.
2. Meshkovsky I.K., Varzhel S.V., Belikin M.N., Kulikov A.V., Brunov V.S. Thermal annealing of Bragg grating on manufacturing of fiber-optic phase sensor. *Journal of Instrument Engineering*, 2013, vol. 56, no. 5, pp. 91–93. (in Russian)
3. Liao C.R., Wang D.N. Review of femtosecond laser fabricated fiber Bragg gratings for high temperature sensing. *Photonic Sensors*, 2013, vol. 3, no. 2, pp. 97–101. https://doi.org/10.1007/s13320-012-0060-9
4. Minkin A.M., Sozonov N.S., Fadeev K.M., Shevtcov D.I. Miniature fiber-optic pressure sensor based on the Fabry–Pérot interferometer. *Proc. of the 2nd All-Russian Conference «Optical Reflexometry-2018»*, 2018, pp. 86–89. (in Russian)
5. Pratt D.J. Optical wavelength sensor. *Patent PCT WO19950020144A1*, 1995.
6. Egorova O.N., Vasil'ev S.A., Likhachev I.G., Sverchkov S.E., Galagan B.I., Denker B.I., Semjonov S.L., Pustovoi V.I. A Fabry–Perot interferometer formed in the core of a composite optical fibre heavily doped with phosphorus oxide. *Quantum Electronics*, 2019, vol. 49, no. 12, pp. 1140–1144. https://doi.org/10.1070/QEL17133
7. Huang C., Xie W., Lee D., Qi C., Yang M., Wang M., Tang J. Optical fiber humidity sensor with porous $TiO_2/SiO_2/TiO_2$ coatings on fiber tip. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, vol. 27, no. 14, pp. 1495–1498. https://doi.org/10.1109/LPT.2015.2426726
8. Agafonova D.S. Fiber optical temperature sensor. *Patent RU155334U1*, 2015. (in Russian)
9. Egorova O.N., Semjonov S.L., Velmiskin V.V., Yatsenko Yu.P., Sverchkov S.E., Galagan B.I., Denker B.I., Dianov E.M. Phosphate-core silica-clad Er/Yb-doped optical fiber and cladding pumped laser. *Optics Express*, 2014, vol. 22, no. 7, pp. 7632–7637. https://doi.org/10.1364/OE.22.007632
10. Duan D.W., Rao Y., Hou Y.-S., Zhu T. Microbubble based fiber-optic Fabry-Perot interferometer formed by fusion splicing single-mode fibers for strain measurement. *Applied Optics*, 2012, vol. 51, no. 8, pp. 1033–1036. https://doi.org/10.1364/AO.51.001033
11. Machavaram V.R., Badcock R.A., Fernando G.F. Fabrication of intrinsic fibre Fabry-Perot sensors in silica fibres using hydrofluoric acid etching. *Sensors and Actuators, A: Physical*, 2007, vol. 138, pp. 248–260. https://doi.org/10.1016/j.sna.2007.04.007
12. Liu S., Wang Y., Liao C., Wang G., Li Z., Wang Q., Zhou J., Yang K., Zhong X., Zhao J., Tang J. High-sensitivity strain sensor based on in-fiber improved Fabry–Perot interferometer. *Optics Letters*, 2014, vol. 39, no. 7, pp. 2121–2124. https://doi.org/10.1364/OL.39.002121
13. Ma Z., Pang F., Liu H., Chen Z., Wang T. Air microcavity formed in sapphire-derived fiber for high temperature sensing. *Proc. of the 26th International Conference on Optical Fiber Sensors*, 2018, pp. WF48. https://doi.org/10.1364/OFS.2018.WF48
14. Terent'ev V.S., Simonov V.A. High-finesse multiple-beam reflection interferometer based on dielectric diffraction structure in a single-mode fiber. *Applied Photonics*, 2017, vol. 4, no. 2, pp. 107–120. (in Russian)
15. Tertyshnik A.D., Volkov P.V., Gorjunov A.V., Luk'janov A.J. Fibre-optic interference temperature sensor. Patent RU2466366C1, 2012. (in Russian)
16. Bennett J.M., Pelletier E., Albrand G., Borgogno J.P., Lazarides B., Carniglia C.K., Schmell R.A., Allen T.H., Tuttle-Hart T., Guenther K.H., Saxer A. Comparison of the properties of titanium dioxide films prepared by various techniques. *Applied Optics*, 1989, vol. 28, no. 16, pp. 3303–3317. https://doi.org/10.1364/AO.28.003303
17. Hirsch M., Majchrowicz D., Wierzba P., Weber M., Bechelany M., Jędrzejewska-Szczerska M. Low-coherence interferometric fiber-optic sensors with potential applications as biosensors. *Sensors*, 2017, vol. 17, no. 2, pp. 261. https://doi.org/10.3390/s17020261
18. Lee D., Yang M., Huang C., Dai J. Optical fiber high-temperature sensor based on dielectric films extrinsic Fabry–Pérot cavity. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, vol. 26, no. 21, pp. 2107–2110. https://doi.org/10.1109/LPT.2014.2346622
19. Kireenkov A.Y., Alejnik A.S., Plotnikov M.Y., Mekhrengin M.V. Method of frequency-pulse modulation of a semiconductor laser source of optical radiation for optical interferometric sensors. *Patent RU2646420C1*, 2018. (in Russian)
20. Kireenkov A.Iu. *Fiber-optic interferometric methods for constructing the measuring systems based on a surface-emitting laser.* Dissertation for the degree of candidate of technical sciences. St. Petersburg, NIU ITMO, 2017, 155 p. (in Russian)

20. Киреенков А.Ю. Волоконно-оптические интерферометрические методы для построения измерительных систем на основе поверхностно-излучающего лазера: дисертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.11.01 / НИУ ИТМО. СПб., 2017. 155 с.
21. Ефимов М.Е. Метод и аппаратура для регистрации акустической эмиссии и деформаций композитного графит-эпоксидного материала на основе анализа амплитудно-фазовых характеристик сигнала волоконно-оптического интерферометра Фабри-Перо: диссертация на соискание ученой степени. кандидата технических наук: 05.11.01 / НИУ ИТМО. СПб., 2018. 147 с.
22. Plotnikov M.Y., Volkov A.V. Adaptive phase noise cancellation technique for fiber-optic interferometric sensors // Journal of Lightwave Technology. 2021. V. 39. N 14. P. 4853–4860. https://doi.org/10.1109/JLT.2021.3075781
23. Volkov A.V., Plotnikov M.Y., Mekhrengin M.V., Miroshnichenko G.P., Aleynik A.S. Phase modulation depth evaluation and correction technique for the PGC demodulation scheme in fiber-optic interferometric sensors // IEEE Sensors Journal. 2017. V. 17. N 13. P. 4143–4150. http://dx.doi.org/10.1109/JSEN.2017.2704287
24. Lee C.E., Atkins R.A., Taylor H.F. Performance of a fiber-optic temperature sensor from -200 to 1050°C // Optics Letters. 1988. V. 13. N 11. P. 1038–1040. https://doi.org/10.1364/OL.13.001038
25. Gao H., Jiang Y., Cui Y., Zhang L., Jia J., Jiang L. Investigation on the thermo-optic coefficient of silica fiber within a wide temperature range // Journal of Lightwave Technology. 2018. V. 36. N 24. P. 5881–5886. https://doi.org/10.1109/JLT.2018.2875941

21. Efimov M.E. *Method and equipment for the recording acoustic emission and deformations of a composite graphite-epoxy material based on the analysis of the amplitude-phase characteristics of the signal from a fiber-optic Fabry-Pérot interferometer.* Dissertation for the degree of candidate of technical sciences. St. Petersburg, NIU ITMO, 2018, 147 p. (in Russian)
22. Plotnikov M.Y., Volkov A.V. Adaptive phase noise cancellation technique for fiber-optic interferometric sensors. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, vol. 39, no. 14, pp. 4853–4860. https://doi.org/10.1109/JLT.2021.3075781
23. Volkov A.V., Plotnikov M.Y., Mekhrengin M.V., Miroshnichenko G.P., Aleynik A.S. Phase modulation depth evaluation and correction technique for the PGC demodulation scheme in fiber-optic interferometric sensors. *IEEE Sensors Journal*, 2017, vol. 17, no. 13, pp. 4143–4150. http://dx.doi.org/10.1109/JSEN.2017.2704287
24. Lee C.E., Atkins R.A., Taylor H.F. Performance of a fiber-optic temperature sensor from -200 to 1050°C. *Optics Letters*, 1988, vol. 13, no. 11, pp. 1038–1040. https://doi.org/10.1364/OL.13.001038
25. Gao H., Jiang Y., Cui Y., Zhang L., Jia J., Jiang L. Investigation on the thermo-optic coefficient of silica fiber within a wide temperature range. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, vol. 36, no. 24, pp. 5881–5886. https://doi.org/10.1109/JLT.2018.2875941

## Авторы

**Моор Янина Дмитриевна** — инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, SC 57214998978, https://orcid.org/0000-0002-1624-2659, yanoti@yandex.ru
**Коннов Кирилл Александрович** — кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, SC 56032492300, https://orcid.org/0000-0002-8888-3527, kirillkonnov1991@gmail.com
**Плотников Михаил Юрьевич** — кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, SC 57193069973, https://orcid.org/0000-0003-2506-0379, plotnikov-michael@yandex.ru
**Волков Антон Валерьевич** — кандидат технических наук, научный сотрудник, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, SC 57194565170, https://orcid.org/0000-0002-7988-5854, avvolkov9223@gmail.com
**Варжель Сергей Владимирович** — кандидат физико-математических наук, доцент, старший научный сотрудник, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, SC 55247304200, https://orcid.org/0000-0002-3120-8109, Vsv187@gmail.ru
**Коннов Дмитрий Александрович** — инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, https://orcid.org/0000-0002-8256-973X, dakonnov@itmo.ru
**Стригалев Владимир Евгеньевич** — кандидат физико-математических наук, доцент, профессор, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, SC 6603225596, https://orcid.org/0000-0002-7151-9235, vstrglv@mail.ru

## Authors

**Ianina D. Moor** — Engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, SC 57214998978, https://orcid.org/0000-0002-1624-2659, yanoti@yandex.ru
**Kirill A. Konnov** — PhD (Physics & Mathematics), Researcher, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, SC 56032492300, https://orcid.org/0000-0002-8888-3527, kirillkonnov1991@gmail.com

**Michael Yu. Plotnikov** — PhD, Senior Researcher, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, SC 57193069973, https://orcid.org/0000-0003-2506-0379, plotnikov-michael@yandex.ru

**Anton V. Volkov** — PhD, Scientific Researcher, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, SC 57194565170, https://orcid.org/0000-0002-7988-5854, avvolkov9223@gmail.com

**Sergey V. Varzhel** — PhD, Associate Professor, Senior Researcher, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, SC 55247304200, https://orcid.org/0000-0002-3120-8109, Vsv187@gmail.ru
**Dmitriy A. Konnov** — Engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, https://orcid.org/0000-0002-8256-973X, dakonnov@itmo.ru
**Vladimir E. Strigalev** — PhD (Physics & Mathematics), Associate Professor, Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, SC 6603225596, https://orcid.org/0000-0002-7151-9235, vstrglv@mail.ru

*Статья поступила в редакцию 17.02.2022*
*Одобрена после рецензирования 02.04.2022*
*Принята к печати 19.05.2022*

*Received 17.02.2022*
*Approved after reviewing 02.04.2022*
*Accepted 19.05.2022*

Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ
май–июнь 2022 Том 22 № 3 http://ntv.ifmo.ru/
SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL OF INFORMATION TECHNOLOGIES, MECHANICS AND OPTICS
May–June 2022 Vol. 22 No 3 http://ntv.ifmo.ru/en/
ISSN 2226-1494 (print) ISSN 2500-0373 (online)
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК УНИВЕРСИТЕТ ИТМО
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ

doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-3-450-458

# Optical system design method for the concentration of radiation from a high-power LED

**Galina E. Romanova[1], Xuanlin Qiao[2], Olga K. Kozlova[3]✉**

[1,2,3] ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

[1] romanova_g_e@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-9348-8540
[2] qiaoxuanlindhr@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-3957-9270
[3] okk812@mail.ru✉, https://orcid.org/0000-0002-7038-5618

**Abstract**

An optical system is considered that ensures the concentration of radiation from an LED emitting within a hemisphere onto a near-field illuminated area. The system is proposed to consider such a system as a composition of two zones — the central zone, which is a lens, and the zone responsible for capturing radiation from the LED within an angle of 40 to 90 degrees. Variants with a central zone in the form of bi-aspherical and sphero-elliptical lenses of finite thickness are analyzed. The alternative variant of the concentrating system composed from a collimating TIR lens and additional focusing lens is also analyzed. The expressions are given that allow analyzing possible concentration efficiency and the light spot size, and examples of systems are given designed with taking into account theoretical analysis results. Factors are discussed that define the choice of the required configuration. The results have shown the good agreement between the theoretical approach and practical design results. The optical elements designed as examples showed the high optical efficiency (near 90 %), thus such approach can be used for designing the LED optical systems for efficient light flux concentration, for example operating with fiber bundle as needed in some optical — electronic devices.

**Keywords**

LED, fiber bundle, concentration of radiation, optical systems design

**Acknowledgements**

Xuanlin Qiao acknowledges support from the China Scholarship Council (ID 201908090046).

**For citation:** Romanova G.E., Qiao X., Kozlova O.K. Optical system design method for the concentration of radiation from a high-power LED. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2022, vol. 22, no. 3, pp. 450–458. doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-3-450-458

УДК 535.317, 681.7.01

# Метод проектирования оптической системы для концентрации излучения мощных светодиодов

**Галина Эдуардовна Романова[1], Сюаньлинь Цяо[2], Ольга Кирилловна Козлова[3]✉**

[1,2,3] Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

[1] romanova_g_e@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-9348-8540
[2] qiaoxuanlindhr@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-3957-9270
[3] okk812@mail.ru✉, https://orcid.org/0000-0002-7038-5618

**Аннотация**

**Предмет исследования.** Рассмотрена оптическая система, обеспечивающая концентрацию излучения светодиода, излучающего внутри полусферы, на освещаемую площадку, расположенную в ближней зоне. **Метод.** Систему предлагается рассматривать в виде композиции центральной зоны, которая представляет собой классическую собирающую линзу, и рабочей зоны, отвечающей за работу с излучением светодиода в пределах угла от 40 до 90º относительно оси. **Основные результаты.** Выполнен анализ вариантов с центральной зоной в виде биасферической и сфероэллиптической линзы конечной толщины. Проанализирован альтернативный вариант концентрирующей системы в составе коллимирующей линзы, которая работает на основе эффекта полного

© Romanova G.E., Qiao X., Kozlova O.K., 2022

внутреннего отражения и дополнительной фокусирующей линзы. Приведены математические выражения для оценки возможной эффективности концентрации и размеров светового пятна. Показаны примеры систем, разработанных с учетом результатов теоретического анализа. Обсуждаются факторы определения выбора требуемой конфигурации системы. Представлены примеры оптических элементов, которые показали близкую к 90 % оптическую эффективность. **Практическая значимость.** Предложенный подход может быть использован при проектировании светодиодных оптических систем для эффективной концентрации светового потока в некоторых оптико-электронных системах, в частности, при передаче сигнала по волоконно-оптическому жгуту.

**Ключевые слова**
светодиод, волоконный жгут, освещение в ближней зоне, концентрация излучения, проектирование оптических систем

**Благодарности**
Сюаньлинь Цяо благодарит за поддержку Китайский стипендиальный совет (ID 201908090046).

**Ссылка для цитирования:** Романова Г.Э., Цяо С., Козлова О.К. Метод проектирования оптической системы для концентрации излучения мощных светодиодов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2022. Т. 22, № 3. С. 450–458 (на англ. яз.). doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-3-450-458

## Introduction

Lighting systems are often an essential part of various optoelectronic devices, and in modern compact devices for various purposes high-power LEDs are used as a source of illumination. For example, systems of modern Liquid Crystal Display and Digital Light Processing projectors can be built using Light-Emitting Diode (LED) optics [1–4]. LEDs can also be used in systems that utilize light guides and fiber optics when it is necessary to transmit the light flux over a relatively long distance to ensure the operation of the device [5].

Among the systems used as components of optoelectronic devices, one can distinguish collimating systems that form a beam close to parallel, and systems whose role is to concentrate the light flux on the illuminated area.

Methods for LED optics design usually come down to calculating a generating curve for a cross-section of the system or several curves (for the case of non-axisymmetric systems), among these methods Simultaneous Multiple Surface (SMS) methods [6] and ray mapping methods [7] should be mentioned. These methods make it possible to accurately restore the generating curve from a known or desired illumination distribution; however, they, as a rule, are quite time-consuming and require extensive mathematical calculations.

Alternatively, for collimating optics, it is possible to use the method of analysis and synthesis of lens profile by combination of the curves in the zones that correspond to different beam angles of the source, and in each zone the theory of third-order aberrations is applied to find the optimal shape [8–11]. This approach makes it possible both to preliminary estimate the dimensions of the system and to quickly and efficiently synthesize the shape of a lens that works with an LED.

In optical devices, a case often occurs when a beam that is close to parallel does not provide optimal operation of the device. For example, it is necessary to fill the aperture of a micro-objective with light, to collect the light flux on a certain area, to concentrate the light beam on the input end of a bundle of fibers or a light guide, etc. In these cases, the direct application of the method based on the theory of the third-order aberrations, developed for the case of collimating optics, is impossible. Existing methods, such as SMS and ray-mapping technique, as in other cases, have the same disadvantages as was mentioned above.

Therefore, it is important to supplement the method for calculating systems working with LEDs by considering the case when the illuminated area is located at a finite distance, and it is required to ensure the maximum use of the luminous flux.

## Theory

The classical method for calculating an optical system at the first stage includes an assessment of its capabilities — as a rule, using the Lagrange-Helmholtz invariant [12]. However, a preliminary assessment of the potential properties of the system does not make it possible to evaluate its design. Known solutions condenser lenses and lens systems, for which recommendations on the number of elements are approximately known, depending on the magnification of the system and the angle of coverage of the condenser, which, in the case of an LED, will determine the efficiency of using the light flux. Table 1 shows the calculated values of the efficiency of using the luminous flux when working with condensers with different coverage angles of 2Ω. In this case, the efficiency is calculated as the fraction of the flux that falls within the considered angle using the model of an ideal flat Lambertian source [12].

High-aperture condenser systems can be used when working with high-power LED assemblies and matrices that require additional heat removal. Thus, such systems have large dimensions. On the other hand, in such systems

*Table 1.* The efficiency of using the luminous flux depending on the condenser coverage angle for a Lambertian source emitting into a hemisphere

| Angle Ω, deg | Efficiency, % |
|---|---|
| 15 | 6.7 |
| 30 | 25 |
| 45 | 50 |
| 60 | 75 |
| 75 | 93.3 |
| 90 | 100 |

it is not so crucial to achieve high efficiency of using the luminous flux.

However, when working with light sources embedded into modern optoelectronic devices, an important factor in their choice can be the dimensions, and, accordingly, the dimensions of the lighting device. At the same time, the efficiency of work (the efficiency of capturing and transmitting the light flux from the source to the illuminated object) can have a great effect on the illumination quality as well as affect the energy consumption of the device. Therefore, the task is important that consists in the development of a design method that allows, at the stage of selecting the source and the principal layout design of the device, to evaluate the efficiency as well as dimensions.

As was shown before for the case of a collimator [8, 9], for initial synthesis of a system operating with an LED it is sufficient to consider two zones of the light beam. In the case of severe dimensional constraints, more zones may be considered.

The first option — systems for concentration is a combination of a lens in the central zone and a reflective surface in zone *II* (Fig. 1). In this case, the concentration of the light flux is carried out due to the projection of the luminous area of the source onto the illuminated area. In Fig. 1 the angle σ defines the size of the central zone.

Let us consider the central zone *I*. If the central zone is a thick lens, it has several parameters for providing necessary aberration correction and scale of the light spot: for a thick lens both surfaces could have aspherical shape and the shape of the lens could be chosen to find optimal balance of the aberration and required optical power. Even though the systems under consideration are not designed for imaging, the correction of aberrations will affect the efficiency of energy transfer and the distribution of energy on the spot.

If we assume that the first surface of the lens is spherical with the center of curvature coinciding the source position, and the second surface is convex aspherical (Fig. 1, *b*), we can obtain simple expressions describing the aberration properties of the lens: the coefficients of spherical aberration $B_0$ and coma $K_0$ [13] of such a lens can be expressed in the form:

$$B_0 = \frac{1+\tilde{d}}{2}\left[\frac{n(n-V)(V-1)^2}{V^3(n-1)} + \frac{(1-nV)^3}{V^3(n-1)^2}k_2\right], \quad (1)$$

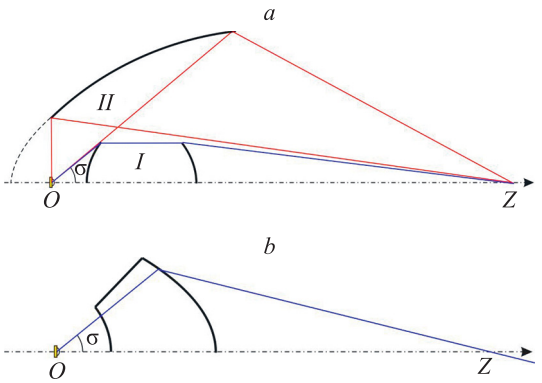



*Fig. 1*. Configuration of the system for concentrating the source radiation: beam splitting into zones, biconvex lens in the central zone (*a*); configuration with a sphero-elliptical lens in the central zone (*b*)

$$K_0 = -\frac{1}{2}\frac{(n-V)(1-V)}{V^2(n-1)}, \quad (2)$$

where $\tilde{d}$ is the thickness of the lens, expressed on the scale of source distance (the distance from the first surface to the source); $V$ is the linear magnification; $n$ is the index of refraction of the material; and $k_2$ is the coefficient of aspherical deformation of the second surface of the lens (conic constant). Obviously, one can correct spherical aberration by varying conic constant $k_2$, however coma will be uncorrected. The plot showing the dependence of $K_0$ on magnification value is presented in Fig. 2.

An analysis of formulas (1), (2) shows that at a negative magnification ($V < 0$) the shape of the second lens surface is an ellipsoid, as in the case of a system that forms a parallel beam. In addition, from formula (2) and the graph in Fig. 2, it can be seen that the coma coefficient $K_0$ decreases in absolute value with increasing the absolute value of magnification $V$, and in the case of small magnification it can reach significant values, thus decreasing the system efficiency. Therefore, for configurations where illumination of a small area is formed due to the projection of the luminous body of the source, it would be more rational to choose a configuration that is closer to symmetrical.

For preliminary analysis in the system, it can be assumed that the marginal ray inside the lens is parallel to the optical axis (paraxial angle $\alpha = 0$). Then the coefficients of spherical aberration and coma for that case can be expressed in the form:

$$B_0 = \frac{n^2(1-V^3) + k_2 - V^3 k_1}{2V^3(n-1)^2}, \quad (3)$$

$$K_0 = -\frac{n^2V(V^2-1)(n-1) - \tilde{d}(n^2+k_2)}{2nV^3(n-1)^2}. \quad (4)$$

In this case, as can be seen from the obtained formulas (3) and (4), due to two aspherical coefficients $k_1$, $k_2$, even when an additional condition is imposed (parallel marginal ray inside the lens), two aberrations can be corrected.

When designing the second zone of the system — a reflecting surface — for concentrating LED radiation in

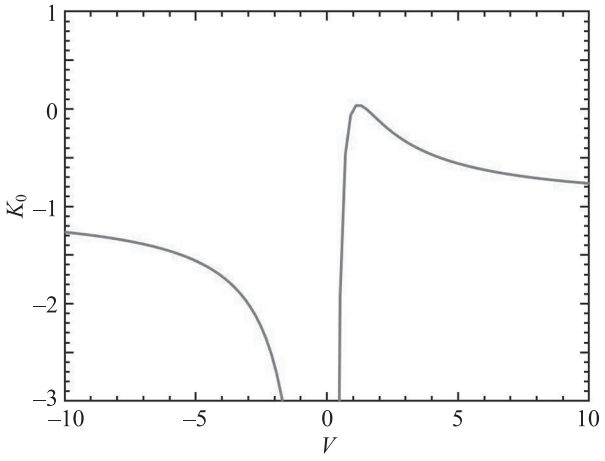



*Fig. 2*. The plot of third-order coma coefficient $K_0$ versus linear magnification $V$ for $n = 1.5$ and $\tilde{d} = 1$

zone *II* (Fig. 1, *a*), several factors need to be considered: geometry constraints — the rays in zone *II* must be completely captured by the reflecting surface; the projection distance must match the projection distance for the lens (central part) system; the projection magnification must match that of the central part.

In this case, the simultaneous exact fulfillment of these conditions seems difficult, since the mirror part in the case under consideration will be a mirror ellipsoid the aperture of which is limited. Thus, such an element could be effectively used only in certain cases. In practice, some balance of efficiency and fulfillment of constraints above could be found as we will show below.

The alternative variant of designing the concentration system is following two steps of beam transformation: on the first stage we use the same theoretical expressions to evaluate the possible dimensions and parameters of the optimal collimation lens [8]; on the second stage we can choose parameters of the more standard element — focusing lens that collects the light onto the desired region.

The two possible collimation lens types are: lens with central zone of plano-hyperboloidal lens (type *I*); and lens with central zone of sphero-elliptical configuration (type *II*).

For both cases outer zone is formed by the paraboloidal surface.

Thus, as was shown before [8], the divergence $\Delta\omega_I$, rad, for the central zone:

$$\Delta\omega_I = (1 - 3\sin^2\sigma K_0)\frac{y}{f_I'}, \quad (5)$$

where $y$ is the source size; $f_I'$ is the focal length of the central zone lens; σ is the angular size of zone *I*; and $K_0$ is coma coefficient. Here for the case of a plano-hyperboloidal lens (type *I*) coma coefficient is described by:

$$K_0 = -\frac{n}{2(n-1)}. \quad (6)$$

For type *II* collimator lens with sphero-elliptical central part coma coefficient is described by:

$$K_0 = -\frac{1}{2(n-1)}. \quad (7)$$

Thus, formulas (6), (7) together with the expression (5) provide the possibility to evaluate the divergence for both options of the central zone, taking into account both factors (the aberrations and the size of the source area).

For the outer zone of the collimating lens, the divergence is:

$$\Delta\omega_{II} = -3\frac{y}{4f_p'}\cos^2\sigma + \frac{y}{f_p'}, \quad (8)$$

where $f_p'$ is the focal length of the outer surface; σ is the angular size of the zone; and $\Delta\omega_{II}$ is the divergence of the beam for the outer zone.

The configurations of possible types of the system based on collimation lens are presented in Fig. 3 schematically: in Fig. 3, *a* the system could be manufactured as a single element, thus decreasing the Fresnel losses, and for the second case (Fig. 3, *b*), as was shown before, the collimation may be better despite the two pieces — collimating lens and focusing lens — are needed.

Thus, the light spot size for the case of combination these lenses together with focusing lens is defined by the divergence of the beam $\Delta\omega_{max}$ before the lens — the maximum from the two values $\Delta\omega_I$ or $\Delta\omega_{II}$ (formulas (5) and (8)).

$$D_{spot} = 2f'\tan\Delta\omega_{max}, \quad (9)$$

where $D_{spot}$ is the spot size on the illuminated area, $f'$ is the focal length of the focusing lens.

The second factor that also defines the spot is coma, mm, for the plano-hyperboloidal lens with corrected spherical aberration coma:

$$coma = -3f'\tan\Delta\omega_{max}K_0\sin^2\sigma_A. \quad (10)$$

Here coma coefficient for plano-hyperboloidal lens is described by equation (6).

In equation (10), $\sigma_A$ is the aperture angle of the lens. For the lens with the given diameter, it could be expressed by the approximate expression:

$$\sin\sigma_A = \mathrm{NA} = \sin\sigma_A \approx \frac{D_{lens}}{2f'}. \quad (11)$$

Obviously, by choosing focal length of the lens together with the parameters of the collimating part one can analyze possible properties and find the balance of aberration taking into account the dimensions of the system. Hence, these

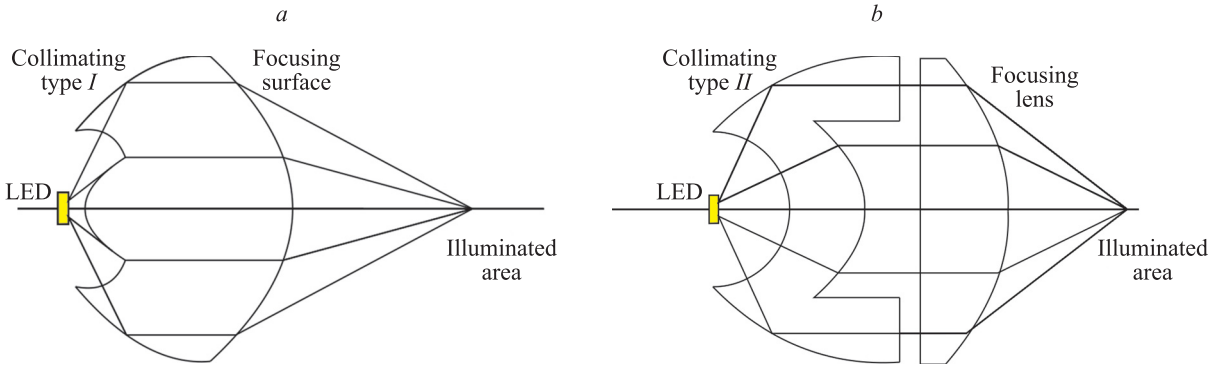



*Fig. 3*. Scheme of optics for fiber bundle: type *I* collimating lens with focusing surface (*a*) and collimating type *II* with additional focusing lens (*b*)

simple ideas could help in choosing and designing the optimum from the point of view of system dimension and efficiency configuration for the illumination part in optical-electronic devices.

## Optical simulation

As was mentioned above, the configuration for the central zone with sphero-elliptical lens and bi-convex lens provides different aberration correction, hence different efficiency. To show the difference visually, two types of lenses were designed. Fig. 4 shows the graphs of the illumination distribution in the system that provides a projection of a 1 × 1 mm LED area with magnifications $V = -4$ and $V = -10$ in two different system configurations — a system with a sphero-elliptical lens and a bi-aspherical one (biconvex with two aspherical surfaces), and in the latter case, the coma of the third-order is corrected.

The calculations were carried out by tracing 10 million rays in the scheme with a Lambertian source with 1 ×1 mm in size, with a flux of 1 W (the chosen value of the flux is due to the convenience of the calculation) using Zemax Optic Studio [14]. Lens configurations were preliminary designed using the third-order aberration theory and then optimized to correct for spherical aberration more accurately. As can be seen from the graphs, the sphero-elliptical lens configuration provides more uniform illumination; however, the bi-aspherical lens provides higher illumination due to more efficient energy concentration in the case of coma correction.

An example of a system consisting of a central lens part and a mirror ellipsoid is shown in Fig. 5. At the same time, such a system can be implemented in practice as a mirror reflector and a central lens fixed with special mechanical spiders or mounts. Of course, the elements of the lens attachment will affect the efficiency of the transmission of the light flux. The system given below corresponds to the case of the magnification $V = -4$, where the central lens works with the numerical aperture $A = \sin\sigma = 0.4$.

The parameters of the designed examples are given in Table 2.

Parameters of the central part presented in Table 2 are calculated based on the theoretical expressions given above, whereas parameters of the mirror were optimized to find optimal balance between the efficiency of the whole system and its dimensions; because, as was mentioned above, all the geometry constraints and efficiency requirements could

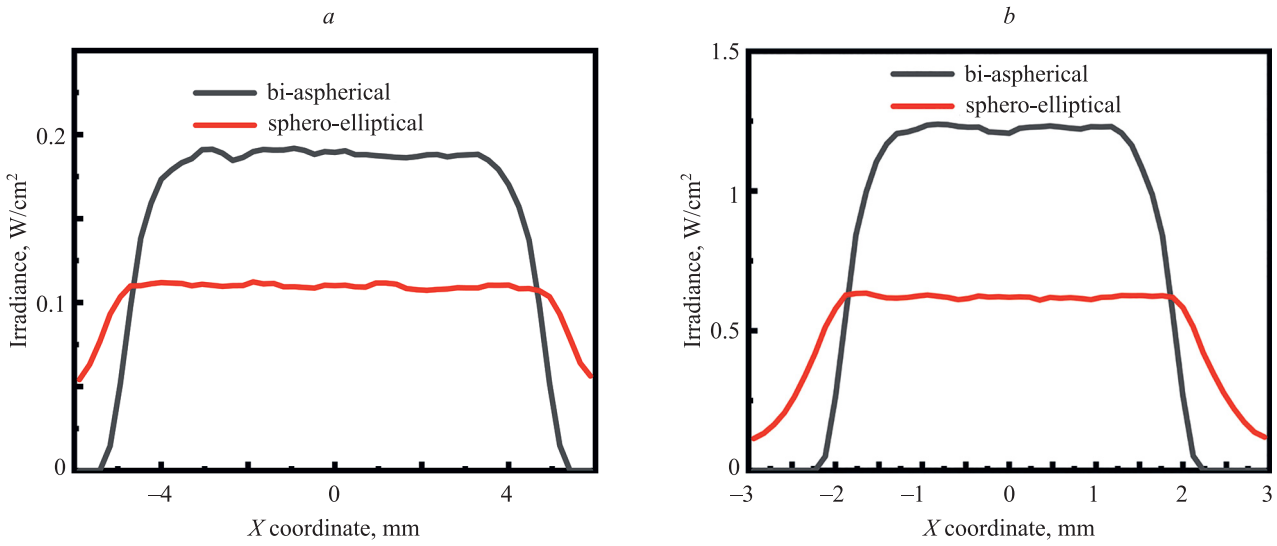



*Fig. 4*. Graphs of the illumination distribution in a system with a sphero-elliptical lens and a bi-aspherical one at $V = -10$ (*a*) and $V = -4$ (*b*)

*Table 2.* Parameters of the optical system

| | | Mirror with sphero-elliptical lens | Mirror with bi-asphere lens |
|---|---|---|---|
| Vertex radius of mirror $r_M$, mm | | 13 | 10 |
| Conic of the mirror $k_M$ | | –0.82 | –0.76 |
| Thickness of the central lens $d$, mm | | 12 | 12 |
| Radius of the first surface of the central lens $r_1$, mm | | –12 | 7.926 |
| Radius of the second surface of the central lens $r_2$, mm | | –6.794 | –13.776 |
| Conic of the first surface $k_1$ | | 0 | –1.469 |
| Conic of the second surface $k_2$ | | –0.61 | –6.186 |
| % of the energy: | in the 10 × 10 mm area | 83 | 92 |
| | in the 6 × 6 mm area | 80 | **87** |

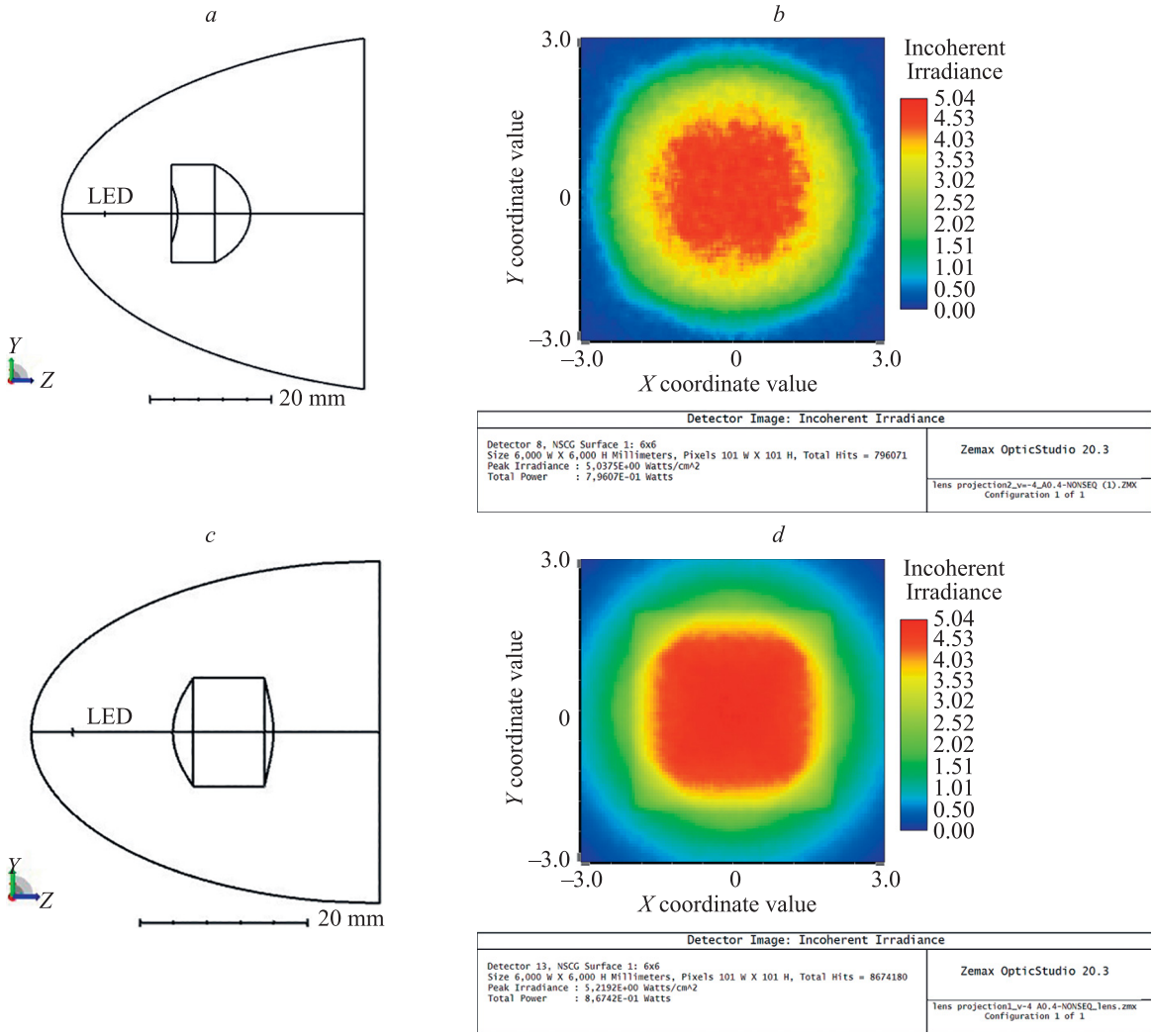



*Fig. 5*. Concentration system consisted of the mirror and the lens part: 2D layout of the system with sphero-elliptical lens (*a*); irradiance distribution for the system with sphero-elliptical central lens (*b*); 2D layout of the system with bi-aspherical lens (*c*); irradiance distribution for the system with bi-aspherical lens (*d*)

be rarely met for the mirror part of the system working together with the lens part.

Fig. 5 shows the 2D system shape and their optical performance. It should be mentioned that all simulations were done without considering Fresnel losses in the system.

The additional analysis has shown that the difference in efficiency and illuminance distribution is obviously due to the central lens part that was described above in details. Thus, choosing the central part configuration according to the requirements of the certain task can help in achieving higher illuminance.

If such a solution is structurally impossible for some reason, then in practice the mirror part can be abandoned, and in the absence of restrictions on the number of elements used, a solution in the form of a multi-lens condenser can be applied, with an appropriate coverage angle, as mentioned earlier [10].

The second option for organizing the concentration of illumination on an object is a combination of a collimating system and a focusing lens. The analysis of the collimating system can be performed as described above, and the focusing system in this case can be a classical lens. Moreover, such a system can also be implemented as a single element[1], and the above considerations allow choosing the optimal option for the central part. This option can be effectively used to transfer radiation into a fiber, an optical homogenizer, etc.

Examples of systems built based on the lens with the central sphero-elliptical lens and the plano-hyperbolic one are shown in Fig. 6. The parameters and the divergence of the collimation for both lens types are presented in Table 3.

The maximum diameter of these lenses is 26 mm, so, by varying the focal length of the additional focusing lens, we can influence the optimal balance between the two factors that define the spot size, or, from the other hand, the efficiency of concentration for the given area size.

Thus, for the $\Delta\omega_{max} = 0.087$ and rad = 5°, we can find for the focal length of the lens $f' = 35$ mm the geometrical spot size $D_1 = 6.12$ mm due to the divergence and additional contribution due to coma is 1.67 mm.

Similarly, for the larger focal length $f' = 45$ mm, the geometrical spot size $D_1 = 7.87$ mm, and the coma is 1.365 mm. As can be seen from this example and from

[1] Carclo Optics. Available at: http://www.carclo-optics.com/optic-10356?optictype=fibre%20coupling (accessed: 29.03.2022).

*Table 3.* Parameters of the collimation parts of the optical systems

| | Collimator type *I* (plano-hyperboloidal central part) | Collimator type *II* (sphero-elliptical central part) |
|---|---|---|
| Paraboloid part: Focal length $f_p'$, mm | 2.2 | 2.2 |
| Focal length of the central lens part $f_1'$, mm | 2.5 | 11.35 |
| Radius of the first surface of the central lens $r_1$, mm | 1.234 | – 4.35 |
| Radius of the second surface of the central lens $r_2$, mm | ∞ | – 3.78 |
| Conic of the first surface $k_1$ | – 2.26 | 0 |
| Conic of the second surface $k_2$ | – | – 0.44 |
| Theoretical full divergence | ±20° | ±5°6′0″ |
| Share of energy inside the corner zone ±5°, % | 70 | 80 |

analysis of the formulas (9)–(11), starting from some values of the focal length the main factor defining the spot size will be the divergence of the beam and the focal length of the focusing lens: the shorter focal length could give better concentration. However, another one factor that should be taken into consideration is the geometrical relations between the lens diameter and its focal length: even for plano-hyperboloidal lens the correction of the spherical aberration is exact for any reasonable aperture, the shorter focal length for given diameters leads to the larger lens thickness that is not optimal for manufacturing.

The focal length of the convergence lens used in the system examples here was chosen as 43 mm. The lens material here is set as PMMA whose index of refraction is about 1.491. In Fig. 6, *b*, *d* the irradiance distribution is shown for the area 6 × 6 mm, which is close to theoretical

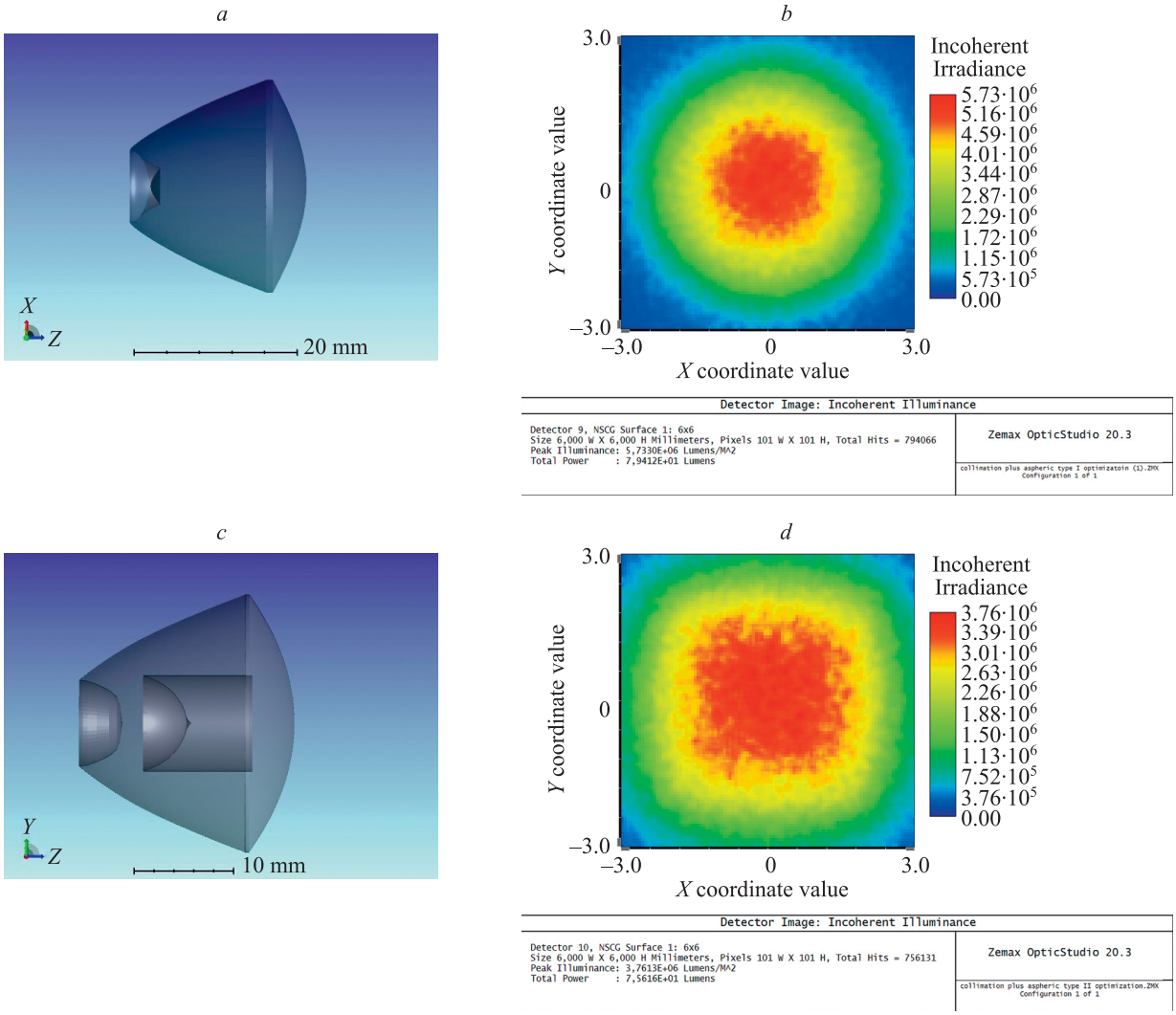



*Fig. 6.* Lens model for fiber bundle of the first type (*a*) and its detector view (*b*), and of the second type (*c*) and its detecor view (*d*)

size of the spot for this case, and the total flux for this area is close to 75–80 % of the total source flux that was predicted by theoretical approximate calculations.

Notably, the lens in Fig. 6, *c* may not be able to be manufactured as a whole lens because the air hole is lying between the focusing lens and the elliptical surface in the central zone. Hence, manufacturing of this lens could be implemented from two parts: collimation and convergence. Then one can join the two optical parts using a fixture or glue to attach one of it to the other.

## Conclusion

The designing process of the concentration systems is described in the work. Theoretical expressions are presented providing necessary theoretical basics to choose optimally the parameters of the system in the conditions of dimensions restrictions and high required efficiency. Four possible configurations of a concentration system are considered. Concentration lenses that provide near field lighting with high optical efficiency near 90 % are designed both based on analysis of the third-order aberration theory and the composing of elements are given as a result demonstrating the proposed approach. The examples presented can be used for real-world application.

## References


1. Sun W.S., Chiang Y.C., Tsuei C.H. Optical design for the DLP pocket projector using LED light source. *Physics Procedia*, 2011, vol. 19, pp. 301–307. https://doi.org/10.1016/j.phpro.2011.06.165
2. Ding Z., Liu Y., Ma Y., Zheng Z., Wang M., Zeng P., She J., Wu R. Direct design of thin and high-quality direct-lit LED backlight systems. *IEEE Photonics Journal*, 2021, vol. 13, no. 2, pp. 9385835. https://doi.org/10.1109/JPHOT.2021.3068746
3. Byzov E.V., Kravchenko S.V., Moiseev M.A., Bezus E.A., Doskolovich L.L. Optimization method for designing double-surface refractive optical elements for an extended light source. *Optics Express*, 2020, vol. 28, no. 17, pp. 24431–24443. https://doi.org/10.1364/OE.400609
4. Liu Z., Liu P., Yu F. Parametric optimization method for the design of high-efficiency free-form illumination system with a LED source. *Chinese Optics Letters*, 2012, vol. 10, no. 11, pp. 112201–112201. https://doi.org/10.3788/COL201210.112201
5. Fu Q., Su C.Y., Zhou Z., He R.L. LED coupled device for fiber-optic illumination. *Journal of Applied Optics*, 2013, vol. 34, no. 1, pp. 45–50. https://doi.org/10.5768/JAO201334.0101008
6. Benítez P., Miñano J.C., Blen J., Mohedano R., Chaves J., Dross O., Hernández M., Falicoff W. Simultaneous multiple surface optical design method in three dimensions. *Optical Engineering*, 2004, vol. 43, no. 7, pp. 1489–1503. https://doi.org/10.1117/1.1752918
7. Wang L., Qian K., Luo Y. Discontinuous free-form lens design for prescribed irradiance. *Applied Optics*, 2007, vol. 46, no. 18, pp. 3716–3723. https://doi.org/10.1364/AO.46.003716
8. Romanova G.E., Qiao X. Composition of collimating optical systems using aberration theory. *Journal of Optical Technology*, 2021, vol. 88, no. 5, pp. 274–281. https://doi.org/10.1364/JOT.88.000274
9. Romanova G.E., Qiao X., Strigalev V.E. Designing a side-emitting lens using the composing method. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2021, vol. 21, no. 2, pp. 147–153. https://doi.org/10.17586/2226-1494-2021-21-2-147-153
10. Chen J.-J., Wang T.-Y., Huang K.-L., Liu T.-S, Tsai M.-D., Lin C.-T. Freeform lens design for LED collimating illumination. *Optics Express*, 2012, vol. 20, no. 10, pp. 10984–10995. https://doi.org/10.1364/OE.20.010984
11. Chen J.-J., Lin C.-T. Freeform surface design for a light-emitting diode-based collimating lens. *Optical Engineering*, 2010, vol. 49, no. 9, pp. 093001. https://doi.org/10.1117/1.3488046
12. *Handbook of Optical Systems*. Ed. by H.Gross. WILEY-VCH Verlag, 2005.
13. Churilovskii V.N. *The Theory of Optical Devices*. St. Petersburg, Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics (TU), 2001, 274 p. Series “Outstanding scientists at ITMO University”. (in Russian)
14. *Zemax OpticStudio 20.3: User Manual*. September 2020.


## Литература


1. Sun W.S., Chiang Y.C., Tsuei C.H. Optical design for the DLP pocket projector using LED light source // Physics Procedia. 2011. V. 19. P. 301–307. https://doi.org/10.1016/j.phpro.2011.06.165
2. Ding Z., Liu Y., Ma Y., Zheng Z., Wang M., Zeng P., She J., Wu R. Direct design of thin and high-quality direct-lit LED backlight systems // IEEE Photonics Journal. 2021. V. 13. N 2. P. 9385835. https://doi.org/10.1109/JPHOT.2021.3068746
3. Byzov E.V., Kravchenko S.V., Moiseev M.A., Bezus E.A., Doskolovich L.L. Optimization method for designing double-surface refractive optical elements for an extended light source // Optics Express. 2020. V. 28. N 17. P. 24431–24443. https://doi.org/10.1364/OE.400609
4. Liu Z., Liu P., Yu F. Parametric optimization method for the design of high-efficiency free-form illumination system with a LED source // Chinese Optics Letters. 2012. V. 10. N 11. P. 112201–112201. https://doi.org/10.3788/COL201210.112201
5. Fu Q., Su C.Y., Zhou Z., He R.L. LED coupled device for fiber-optic illumination // Journal of Applied Optics. 2013. V. 34. N 1. P. 45–50. https://doi.org/10.5768/JAO201334.0101008
6. Benítez P., Miñano J.C., Blen J., Mohedano R., Chaves J., Dross O., Hernández M., Falicoff W. Simultaneous multiple surface optical design method in three dimensions // Optical Engineering. 2004. V. 43. N 7. P. 1489–1503. https://doi.org/10.1117/1.1752918
7. Wang L., Qian K., Luo Y. Discontinuous free-form lens design for prescribed irradiance // Applied Optics. 2007. V. 46. N 18. P. 3716–3723. https://doi.org/10.1364/AO.46.003716
8. Romanova G.E., Qiao X. Composition of collimating optical systems using aberration theory // Journal of Optical Technology. 2021. V. 88. N 5. P. 274–281. https://doi.org/10.1364/JOT.88.000274
9. Romanova G.E., Qiao X., Strigalev V.E. Designing a side-emitting lens using the composing method // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2021. Т. 21. № 2. С. 147–153. https://doi.org/10.17586/2226-1494-2021-21-2-147-153
10. Chen J.-J., Wang T.-Y., Huang K.-L., Liu T.-S, Tsai M.-D., Lin C.-T. Freeform lens design for LED collimating illumination // Optics Express. 2012. V. 20. N 10. P. 10984–10995. https://doi.org/10.1364/OE.20.010984
11. Chen J.-J., Lin C.-T. Freeform surface design for a light-emitting diode-based collimating lens // Optical Engineering. 2010. V. 49. N 9. P. 093001. https://doi.org/10.1117/1.3488046
12. Handbook of Optical Systems / ed. by H.Gross. WILEY-VCH Verlag, 2005.
13. Чуриловский В.Н. Теория оптических приборов. СПб.: СПбГИТМО (ТУ), 2001. 274 с. (Серия «Выдающиеся ученые ИТМО»).
14. Zemax OpticStudio 20.3: User Manual. September 2020.

**Authors**

**Galina E. Romanova** — PhD, Associate Professor, Associate Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, SC 8215289000, https://orcid.org/0000-0001-9348-8540, romanova_g_e@mail.ru
**Xuanlin Qiao** — PhD Student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, https://orcid.org/0000-0002-3957-9270, qiaoxuanlindhr@gmail.com

**Olga K. Kozlova** — Student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, https://orcid.org/0000-0002-7038-5618, okk812@mail.ru

**Авторы**

**Романова Галина Эдуардовна** — кандидат технических наук, доцент, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, SC 8215289000, https://orcid.org/0000-0001-9348-8540, romanova_g_e@mail.ru
**Цяо Сюаньлинь** — аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, https://orcid.org/0000-0002-3957-9270, qiaoxuanlindhr@gmail.com

**Козлова Ольга Кирилловна** — студент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, https://orcid.org/0000-0002-7038-5618, okk812@mail.ru

*Received 30.03.2022*
*Approved after reviewing 17.04.2022*
*Accepted 19.05.2022*

*Статья поступила в редакцию 30.03.2022*
*Одобрена после рецензирования 17.04.2022*
*Принята к печати 19.05.2022*

Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ
май–июнь 2022 Том 22 № 3 http://ntv.ifmo.ru/
SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL OF INFORMATION TECHNOLOGIES, MECHANICS AND OPTICS
May–June 2022 Vol. 22 No 3 http://ntv.ifmo.ru/en/
ISSN 2226-1494 (print) ISSN 2500-0373 (online)
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК УНИВЕРСИТЕТ ИТМО
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ

doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-3-459-471

# Detection of potholes on road surfaces using photogrammetry and remote sensing methods (review)

**Shahrul Nizan Abd Mukti[1], Khairul Nizam Tahar[2]✉**

[1] Dewan Bandaraya Kuala Lumpur, Kuala Lumpur, 50350, Malaysia
[2] Universiti Teknologi MARA (UiTM), Shah Alam, 40450, Malaysia

[1] shahrulnizan58@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-0498-0654
[2] nizamtahar@gmail.com✉, https://orcid.org/0000-0003-2065-7993

**Abstract**
An overview of methods for obtaining 2D and 3D models of defects on the pavement is given. The integrity of the pavement can be affected by factors such as temperature, humidity, weathering and loads. Potholes are one of the most common types of pavement failure. These defects are the signs of structural failures in an asphalt road. The process of collecting and analyzing data is critical to pavement maintenance. Finding and quantifying pothole geometry information is essential to understand road maintenance forecasts and to determine the right asphalt maintenance strategies. Visual detection of road defects is costly and time consuming. Today, there are quite a lot of studies in the scientific literature showing methods for automatic detection and recognition of potholes. In our work, we consider methods for automatic detection and classification of potholes using tools — sensors integrated with a positioning system. The technique of processing two-dimensional (2D) images using various methods of machine classification allows you to determine the precise geometry of the pothole. Algorithmic methods such as artificial neural networks, decision trees, support vector machines, and fuzzy classification are used to improve the accuracy of image processing and highlight the edges of potholes. A three-dimensional model of the pothole (3D) can be obtained based on laser scanning data and photogrammetry methods. The paper summarizes various methods and proposed techniques for extracting a 3D pothole model. The results of the work can be used to improve the infrastructure for maintaining road surfaces.

**Keywords**
classification, image, processing, model, pavement defect, pothole

**Acknowledgements**
The authors thank the Faculty of Architecture, Planning and Surveying of the Universiti Teknologi MARA (UiTM), the Research Management Center (RMC) and the Ministry of Higher Education (MOHE) for providing the GPK 600-RMC/GPK 5/3 (223/2020) Foundation grant, as well as FRGS for grant FRGS/1/2021/WAB07/UITM/02/2.

**For citation:** Abd Mukti S.N., Tahar K.N. Detection of potholes on road surfaces using photogrammetry and remote sensing methods (review). *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2022, vol. 22, no. 3, pp. 459–471. doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-3-459-471

УДК 004.932

# Обнаружения выбоин на дорожных покрытиях с использованием методов фотограмметрии и дистанционного зондирования (обзор)

**Шахрул Низан Абд Мукти[1], Хайрул Низам Тахар[2]✉**

[1] Администрация Куала-Лумпура, Куала-Лумпур, 50350, Малайзия
[2] Технологический университет MARA (UiTM), Шах-Алам, 40450, Малайзия

[1] shahrulnizan58@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-0498-0654
[2] nizamtahar@gmail.com✉, https://orcid.org/0000-0003-2065-7993

**Аннотация**
Приведен обзор методов получения двухмерных (2D) и трехмерных (3D) моделей дефектов на дорожном покрытии. На целостность дорожного покрытия могут влиять такие факторы, как температура, влажность,

© Abd Mukti S.N., Tahar K.N., 2022

атмосферные воздействия и нагрузки. Один из самых распространенных видов разрушения дорожного покрытия выбоины, которые являются признаками структурных разрушений асфальтовой дороги. Процесс сбора и анализа данных имеет решающее значение при обслуживании дорожного покрытия. Обнаружение и количественная оценка информации о геометрии выбоин необходима для понимания прогноза работ по содержанию дорог и для определения правильных стратегий ухода за асфальтовым покрытием. Визуальное обнаружение дорожных дефектов дорогостоящее и трудоемкое. В настоящее время в научных работах представлены многочисленные исследования, показывающие способы автоматического обнаружения и распознавания выбоин. В настоящей работе рассмотрены методы автоматического обнаружения и классификации выбоин с использованием инструментальных средств — датчиков, интегрированных с системой позиционирования. Техника обработки 2D-изображений с использованием методов машинной классификации позволяет определить и уточнить геометрию выбоины. Для повышения точности обработки изображений и выделения краев выбоин применяются такие алгоритмические методы как искусственные нейронные сети, деревья решений, методы опорных векторов и нечеткой классификации. 3D-модель выбоины может быть получена на основе данных лазерного сканирования и методов фотограмметрии. В работе обобщены различные методы и предложенная техника для извлечения 3D-модели выбоины. Результаты работы могут найти применение для улучшения инфраструктуры обслуживания дорожных покрытий.

**Ключевые слова**
классификация, изображение, обработка, модель, дефект дорожного покрытия, выбоина

**Благодарности**
Авторы выражают благодарность Факультету архитектуры, планирования и геодезии Университета Технологии MARA (UiTM), Центру управления научными исследованиями (RMC) и Министерству высшего образования (MOHE) за предоставление грант Фонда ГПК 600-РМЦ/ГПК 5/3 (223 /2020), а также FRGS за предоставление гранта FRGS/1/2021/WAB07/UITM/02/2.

**Ссылка для цитирования:** Абд Мукти Ш.Н., Тахар Х.Н. Обнаружения выбоин на дорожных покрытиях с использованием методов фотограмметрии и дистанционного зондирования (обзор) // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2022. Т. 22, № 3. С. 459–471 (на англ. яз.). doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-3-459-471

## Introduction

Deterioration of the road surface accumulates over time and traffic makes the situation worse. If maintenance does not perform by its time, the asphalt tear can create a pothole. The conventional method for road detection needs technicians for manual data collection and many working hours for a rough estimation of damage on the road. Making a repair decision and budgeting depending on the information of pothole damaged information is covered in [1]. Current practice implements now sophisticated digital inspection use (time-consuming and costly task). Secondly, the procedure is too dependent on the worker's precision during measure the pothole (subjective and biased thread of features).

There are many road assessment procedures, but not all are applied and used in practice by the department of authorities. The method of identifying defects in the main road varies depending on a person involved and background author (Fig. 1). But the same is the case in terms of product entry; however, different perspectives and detailed research are done based on the expertise of the author. Defect detection is to distinguish the part of the defect from other parts in the image [2]. The process is to locate the region pixels of the defect and classify the type of defect.

Reference [3] presents 3 main types of road defect methods: vibration method, vision-based method and 3D reconstruction. According to a different author, reference [2] proposed image processing method, machine learning method and 3D imaging method. However, the features of detection are more concentrated on crack defect. Nevertheless, the conceptual procedure still remains the same. Image processing have the same concept with vision based method, while 3D imaging is a same method as explained in [3] using 3D reconstruction method. Table 1 shows a method of defect detection. Defects including all deteriorated road surfaces such as potholes crack, rutting and others are considered in [4].

## Sensorial method

The sensorial-based method is a technique that uses an accelerometer on a vehicle platform based for data




*Fig. 1*. Sample surface defect types [2]

*Table 1.* Method of defect detection [4]

| Item | Vibration method | Vision based method/2D method | 3D reconstruction |
|---|---|---|---|
| Equipment | Vibrator, gyroscope sensor, absorber sensor, mobile phone gyro | RGB camera, multispectral camera, satellite imagery | Stereo camera, RGB camera, laser scanner |
| Technique | Z-direction displacement | RGB image processing, multispectral classification | Stereo vision, photogrammetry, Light Detection and Ranging (LiDAR) |
| Platform | Car, van and mobile phone | Drone, car, van, satellite | Drone, car |

collection. The advantages of this method are the small storage requirement, cost-effectiveness and feasibility for automatic real-time data processing. However, it does not provide detailed distress conditions of the road. The service condition of the vehicle also has a different impact on the result obtained from another vehicle; hence it needs constant vehicle parameters to make sure the data is comparable. Table 2 shows a previous study for sensorial method.

The same concept applies in [7] using a gyroscope sensor. The vibration data was obtained from vehicles running over four road types. Fig. 2 shows a proposed flowchart of the pothole detection. The collected data was used to extract the vehicle maximum rates of pitch, roll and yaw. When applying the machine learning ANN, the classification damage rates at 85 % of accuracy. Sensor equipment is a non-based technique that needs machine learning to classify road damage. In analogy, the image shows the surface of the pavement, but the vibration-based system feels the surface condition based on mechanical responses of the testing vehicle. This method needs high maintenance as the vehicle needs to purposely hit the pothole and other road defects. Sometimes, it picks up the joint bridge as a pothole road defect. Most often the acceleration is used as their input of data translation of road defects.

Due to the rapid economic growth and the advent of fast mobile technologies, there are applications available in a mobile phone [11]. The utilization of mobile for real-time pothole detection is possible now. The accelerometer data is normalized by computing the Euler angle adapted to the pothole detection algorithm. Together they add spatial information to GPS data. Acquired data is sent to the Intelligent Transportation System (ITS). The availability of this system lies in the fact that the mobile phone itself has G-sensors, electronic compass, gyroscope, GPS, microphone and cameras. Basically, the detection system is crucial to acquire real-time information. The algorithm connects to the accelerometer, for example, the current G-zero analysis and in the context of various classes of road irregularities shows true positive indicators up to 90 %.

Under the same concept, this method also used in [8, 9]. The sensor method provides real-time pothole detection. It is a simple and economical method. This method even uses a sensor for detection, but the data processing to finalize the road defect is done by machine learning. The system consists of accelerometers or tilt switches to measure irregularities and also provides real-time data acquisition via two-way wireless communication and reuse of the same. It also has an interface for irregularity monitoring via a cloud-based service. The system consists of GPS and map index provided. The cloud service performs the conversion of the data received from all the devices on the ground simultaneously. The cloud service performs the conversion of the data received from all the devices on the ground simultaneously. This is how different authors use it to differentiate the method. Whether it is a machine learning method based on data segmentation or sensory method based on data input, it is somehow different from the author's point of view from his field of expertise.

The sensory method is a technique of intact measurement to record a defect area. The system functions

*Table 2.* Sensorial method's previous study

| Reference | Method | How it works |
|---|---|---|
| [5] | Mobile sensing with Global Positioning System (GPS) interpolation- z-threshold developed to detect a pothole | The accelerometer data is normalized by Euler angle computation and is adopted in the pothole detection algorithm |
| [6] | Smart phone accelerometer based on Android Operating System (OS) | Provide z-threshold and g-zero which tuple below threshold |
| [7] | Android smart phone with develop Artificial Neural Network (ANN) | Collect optimum size of the training data, the effects of the number of the neurons in the hidden layer, and the level of the achievable classification accuracy |
| [8] | Developed by microcontroller, accelerometer, GPS and zig-bee transmitter for two-way communication | Accelerometers or tilts switches to measure the irregularity and also provides a real time data collection via a two-way wireless communication and reuse of the same |
| [9] | 32-bit ARM Cortex M4 micro-controller and a LSM9DS0 Inertial Measurement Unit module (IMU system) | Record the positioning system and attitudes of platform |
| [10] | Mobile phone | Finding a threshold impact on accuracy of true positive |

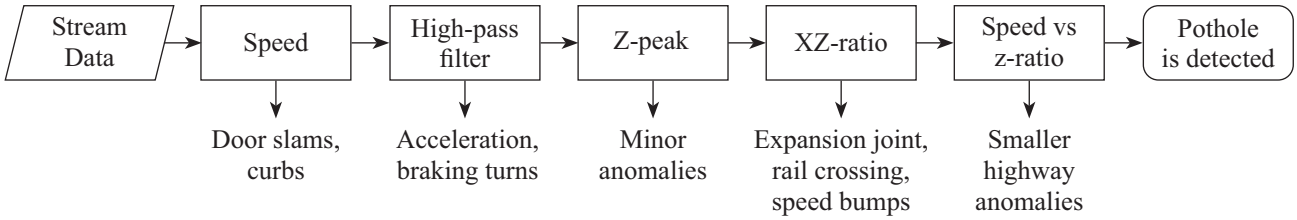



*Fig. 2*. Proposed flowchart of the pothole detection procedure [7]

by a sudden change of elevation and impact received by the sensor. Thus, a vehicle or user system has to hit the pothole defect purposely moving lane-by-lane for that purpose. However, non-hitting potholes do not cause any vibration to the sensorial-system failing the operating detection system [3, 12]. Decision making of the system is inseparable from machine learning applications, especially in data processing. This is a part of the processing to get results. The study distinguishes the method by its method of data input. This includes tools/hardware of sensor method, or image processing product, or 3D point cloud data of 3D reconstruction. All of the mentioned is related to machine learning, supervised, unsupervised, parametric, and non-parametric or any kind of algorithm for data classification purposes. Now, let's look into other methods which have been explained before.

### 2D Image processing

The development of cameras digital photography has greatly advanced road distress detection [13]. Distress detection is to distinguish the type of defect and segmented it from smooth asphalt of the road. Image segmentation is known as a process of assigning a label to every pixel in an image (Fig. 3). Pixel was classified with certain characteristics of a group such as a digital number of spectral reflectance, texture and geometry [14]. Vision based 2D detection originate from image processing and classification method, mostly in RGB format. Image processing mainly includes three categories: threshold segmentation, edge detection and region growing methods; while classification method included pixel-wise, sub-pixel-wise, and object-based image classification methods [15].

The edge detection method determines the edges of the features through edge detection operators such as the Sobel operator, Prewitt operator, and Canny operator (Fig. 4). Reference [16] detects the edge of the defect area using an ant colony algorithm on thermal images. It is studied using a pulsed thermographic system to indicate a defect of SiC Coated High Temperature Super Alloy Substrate. The traditional edge detection method is based on the grey value of the image to determine the edge, but its drawback is various noises that effect to the quality of detection. And much more techniques have been introduced by the researchers, such as Wavelet transform, Wavelet packet edge detection, Edge detection mathematical morphology-based algorithm, Fuzzy theory, and neural network edge detection. Ant colony algorithm advantages are computational speed and less noise of detection, plus it gives complete detection of edge features.

Lastly, the image segmentation is done using a region growing method. This method depicts the information inside the pothole by combining the pixels with similar characteristics to form a group of features. The region is growing from the seed pixel by adding in neighboring pixels that are similar, increasing the size of the region. It's a method for serial segmentation of images. The advantage of this method is relatively simple and usually segmented with the same property region which is associated with the area. And it can provide good boundary information and segmentation. However, the region growing method is an iterative one. The space and time costs are relatively

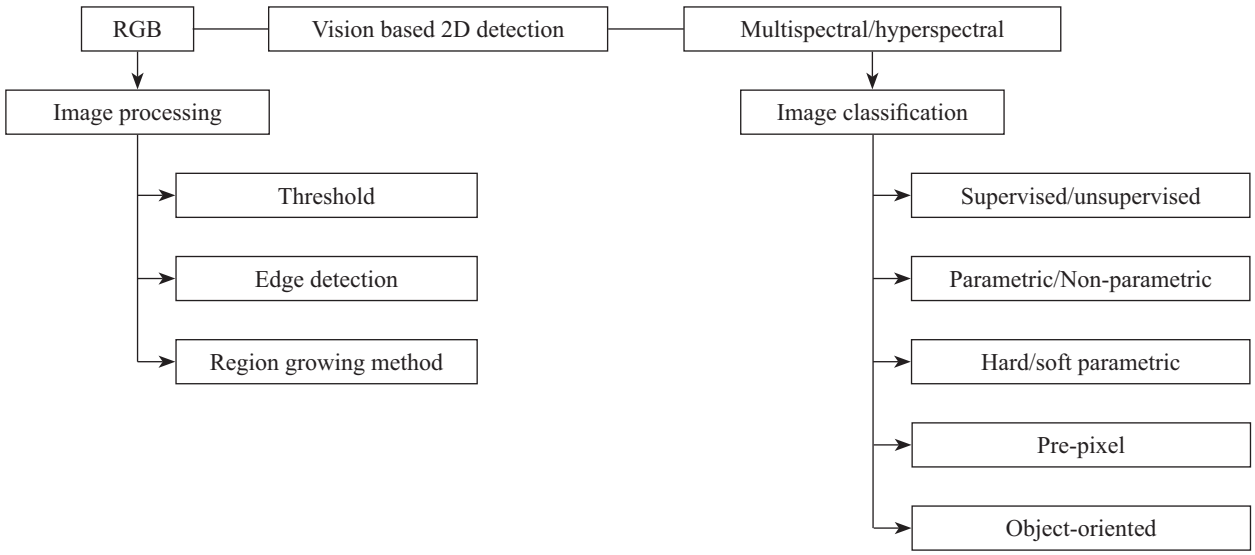



*Fig. 3*. Method of detection from image-based processing

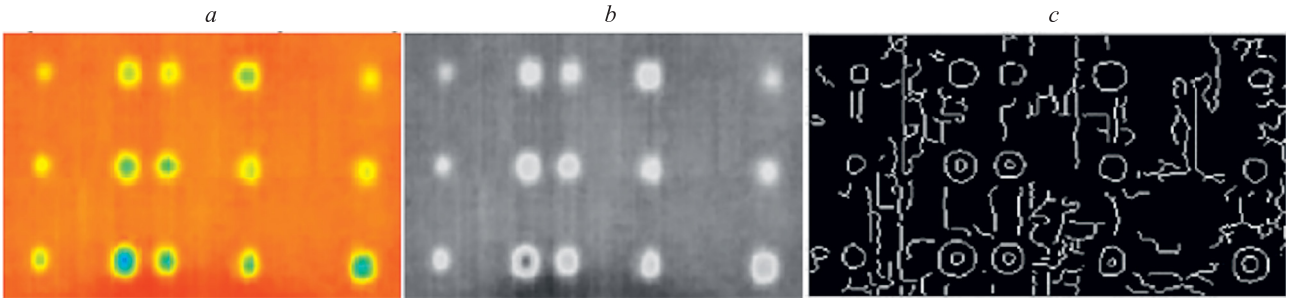



*Fig. 4*. The input infrared image: (*a*), the image after grey level transformation (*b*) and Canny preator edge detection (*c*) [16]

high. The noise and grey levels may cause gaps and over-segmentation. And the region growing method is not very good in image processing [17].

In contrast to the above technologies, reference [18] has addressed automatic object detection in sidewalk images using a unified framework. It then trains a Support Vector Machine (SVM) classifier for each feature separately in a one-against-all paradigm. Reference [19] proposed an automatic detection of potholes in images. The method has segmented asphalt into defective and non-defective regions using a histogram-based threshold. Based on the geometric properties of a defect region, the potential pothole shape is estimated using morphological thinning and elliptical regression. Then, the texture within high degree-defect geometry is extracted and compared to the non-defective roadway to determine if the region in question is indeed a pothole. The shape extraction procedure is shown in Fig. 5.

Reference [21] proposed crack detection by image pre-processing which consists of binary segmentation, morphological operations and remove algorithm. The idea is to remove the isolated dots and area. Then it is proposed a novel algorithm to join the break line of the crack. Another reference [22] presented a method of integrating the processing of grayscale and texture features for detection and segmentation of cement concrete pavement pothole. A machine learning model based on the Library of Support Vector Machines (LIBSVM) is built to distinguish potholes from longitudinal cracks, transverse cracks, and complex cracks (Fig. 6). Single based image method is the most applied for road distress detection. The input of single based image had been used in [1]. The reference [1] has used spectral clustering to identify regions using histogram-based data from greyscale image.

The use of single image-based for pothole detection is widely used. However, no quantification of geometry information such as width and length are available. The calibrated camera is required to obtain camera parameter, to compute its exterior parameter (object coordinate). Thus, for any intention of geometry information extraction, the calibration process before data collection is compulsory.

### Image classification

Image classification of remote sensing-based methods has the potential for pothole detection. Supervised learning and unsupervised learning has been utilized for land use classification and analysis. Both are basic approaches, but they are often combined to form hybrid methods. The most popular output from the classification process is the land use/land cover map. It's a main output of the remote sensing method. However, some use for other purposes such as urban hydrological map [23], urban classification map [24, 25], glacier facies mapping [26], crop map [27, 28], and oil palm [29]. The standard classification procedure of the multispectral and hyperspectral image starts with image correction and includes several steps such as geometric correction, radiometric correction, and hinge cleaning. Secondly, the image contrasts are restored; this includes contrast manipulation, spatial characteristic manipulation, spectrum ratio, main component analysis, additional component and vegetation index analysis. From a different perspective, classification is an overall process of image sensors, image pre-processing, object

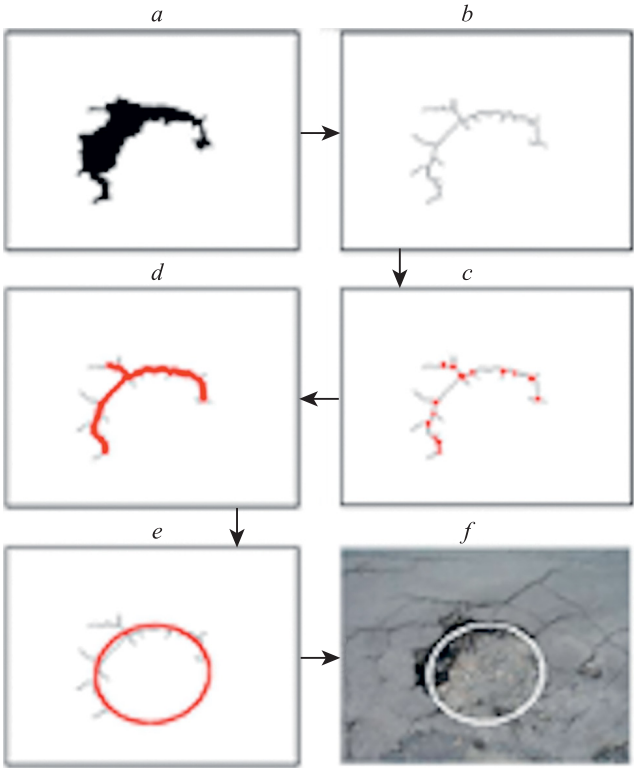



*Fig. 5*. Shape extraction procedure based on a pothole shade: morphological thinning (*a*), shrink the shade region (*b*), skeleton's branching point (*c*), connected major path of shade region, (*e*) boundary of the shape is almost smooth (*d*), entire skeleton defines the major path (*f*) [20]

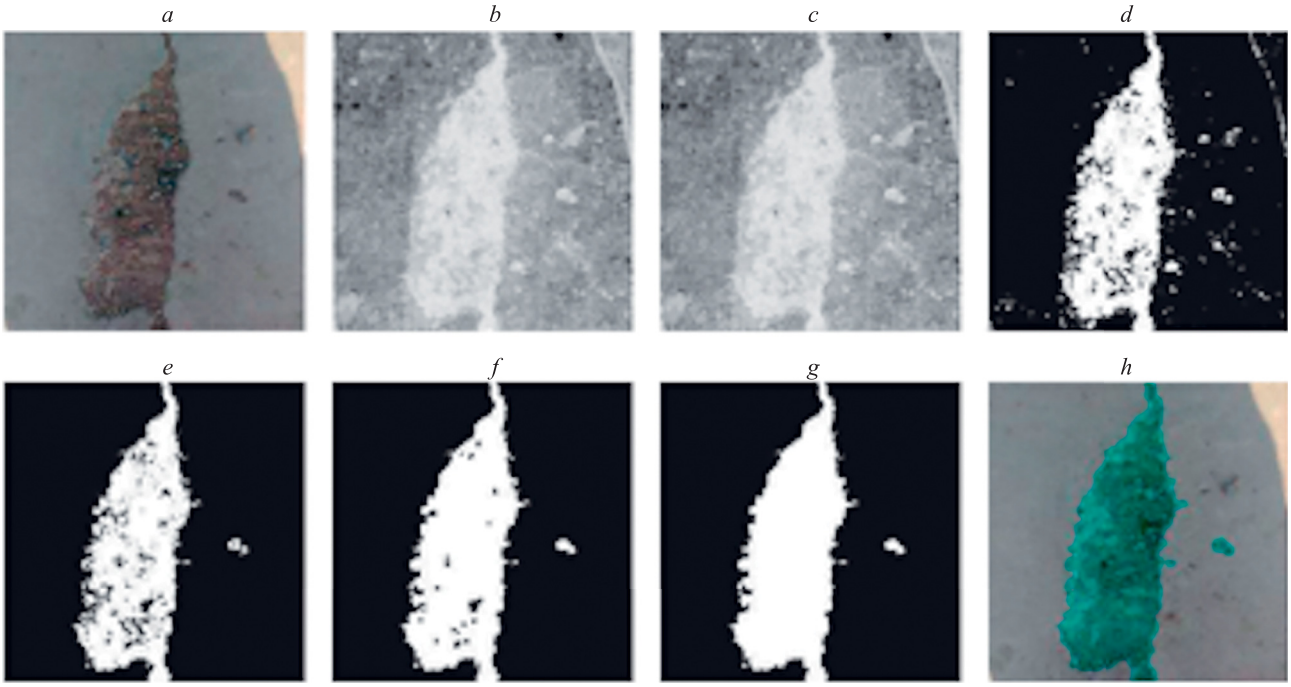



*Fig. 6*. Pothole extraction process: original image (*a*), texture image (*b*), grayscale (*c*), binary image (*d*), remove small object (*e*), morphological (*f*), extraction results (*g*), and mask image (*h*) [22]

detection, object segmentation, feature extraction and object classification [30].

Many classification techniques have been developed for image classification such as ANN, Decision Trees (DT), SVM and fuzzy classification. Image classification approaches are defined by different techniques, e.g., based on the features used (shape-based and motion-based), based on the training sample used (supervised and unsupervised), based on the assumption of parameters for the data (parametric classifier and nonparametric classifier), based on the pixel information used (classifier per pixel, sub-pixel classifier, per-field classifier, object-oriented classifier), based on several outputs for each spatial element (hard classification, soft classification), based on spatial information (spectral classifiers, contextual classifier, spectral-contextual classifier) and finally multiple classifier approach. The input for the classification process is a multispectral/hyperspectral image.

Reference [31] used Hyperspectral (HS) cameras to identify road defects. The HS cameras are considered more discriminative clues for crack detection. HS images used have a spectral range of 350 nm–2500 nm that contains spectra beyond the human vision range (400 nm–700 nm). A new spectral descriptor was proposing to describe the spectrum of road pavement. Reference [32] achieved modest success with Classification and Regression Tree (CART). By using CART, the abundance of cracked road is overestimated, while maximum overall accuracy is only at 68 %. Reference [33] is presenting pattern recognition techniques of pavement defect through Geographic Information System. The pavements degradation rate is representing by distinct spectral characteristics. It uses image indices with the spatial variance measures relating to the remote sensing signal of the pavement condition index. Detection of asphalt is carried out in a two-classification process: a pixel supervised and unsupervised. The unsupervised classification uses linear operation classifier onto a monochromatic format image; supervised classification implements a maximum likelihood algorithm.

Reference [34] combined field spectrometry, in-situ road surveys and hyperspectral remote sensing to explore the potential in mapping road conditions. The proposed method used image ratios and spatial variance measures to relate the remote sensing signal to Peripheral Computer Interconnect (PCI). Image ratios showed the best correlation with the PCI, and variance is correlated with an index describing structural road damages. The authors mentioned the potential of other techniques using short-wave infrared and small absorption features identified in the spectral library analysis. Reference [35] evaluated asphalt pavement surface defects using airborne emissivity data. The authors used a surfacing limestone granules occurrence as a suitable indicator for surface defect assessment. The proposed hybrid of segmentation procedure and emissivity shape-based analysis is applying in this study. This technique allows you to produce rapid discrimination. Reference [36] extracted road asphalt condition using Object-Based Image Analysis (OBIA) and feature selection technique. The chi-square algorithm outperformed SVM and Random Forest (RF) techniques. SVM, RF and feature selection were evaluating to indicate the most effective algorithm. This test can identify which OBIA attributes are best set (spatial, spectral, textural, and color). An algorithm is a medium for classifying road distress that uses learning algorithms with different parameters. The authors used two sub-datasets RGB channels with 12 image bands to represent the Multispectral (MS) images. They concluded to incorporate spectral, geometrical, and textural features as attributes in RF classifier that can produce better delineation

*Table 3.* Review of spectral wavelength, platform and classifier algorithm used

| Reference | Band | Platform | Algorithm |
|---|---|---|---|
| [31] | Hyperspectral (450 nm–950 nm) across 125 channels and fitted with a lens of 23 mm focal length | Unmanned Aerial Vehicle (UAV) | Not Available (NA) |
| [32] | 227 spectral bands spanning the VNIR and SWIR ranges | UAV | CART algorithms |
| [33] | RGB | UAV | Maximum likelihood |
| [34] | 224 individual bands with a nominal bandwidth of 8–11 nm | UAV | NA |
| [35] | Thermal infrared | UAV | Object-oriented approach and Band Depth analysis |
| [36] | MS | UAV | SVM, RF, and chi-square |
| [14, 37] | multispectral camera Micro-Miniature Multiple Camera Array System | fixed-wing UAV | KNN, SVM, ANN, RF |
| [38] | 24 continuous spectral bands from 380.1 nm to 1,033.1 nm | UAV | NA |
| [39] | MS | IKONOS and QuickBird | Multivariate kernel statistic |

of the potholes and cracks. Table 3 shows a review of study of image classification.

Fig. 7 shows a fraction of 3D reconstruction method. The division presents laser scanning, photogrammetry applications and stereovision. Both are not the same in conceptual method but produce the same data (point cloud), so it can be used to derive 3D information such as point cloud elevation, mesh, and Digital Elevation Model (DEM). The laser scanner method receives data from another platform UAV or vehicles for terrestrial view, and uses a technique that employs active laser pulse to generate point cloud data [40, 41]. The data consists of elevation information captured on specific distress features by means of a grid-based processing approach. The irregular surface of the road is automatically revealed by a specific algorithm that detects different elevation and convex hull creation to find the parameter of the defect region. The result accurate quantified the amount of filling material.

3D imaging conceptual design was used for various detection and road monitoring. This section reviews focuses on the hardware side. The accuracy comparison is more appropriate since many laser-based systems use the same technical concept. Laser scanners were used in the study for road mapping. The system is considered as active scanner. It has a double-sided scanning mirror for the dual purpose of projecting and reflecting the light. The imaging system is mounted on a vehicle for road scanning. Deployment of laser scanners has also resulted in several other applications related to pavements. In this regard, a measurement of pavement thickness was reported in [42]. Confidence arises as this method can improve the visualization of the pavement, and finer features have begun to attract researchers' attention. 10 attempts have been made to deploy a 3D laser scanner to measure pavement roughness using the system benchmarking International Roughness Index as their reference. The noted laser-based measurements have a high potential to quantify pavement roughness. In a related effort [43], an integrated multisensorial vehicle was used with laser range scanners for road imaging. The paper provides the system-level details of the mobile platform, a transverse resolution of the system achieved 1 cm. Reference [44] developed a laser triangulation-based mobile system with 2 mm horizontal and vertical resolution respectively. 3D geometric features were obtained and they classify the types of distress such as potholes and rutting. Sub-millimeters accuracy attracts the researchers, who basically use more than 95 % of the research on this technology [45]. However, a laser scanner needs a sturdy UAV platform because the micro-UAVs can't carry scanner due to workload limitations. Additionally, laser scanners capture big data and they require a workstation with the highest specification to handle.

Stereo vision requires high computational effort to construct a 3D pothole or other road defects. The matching

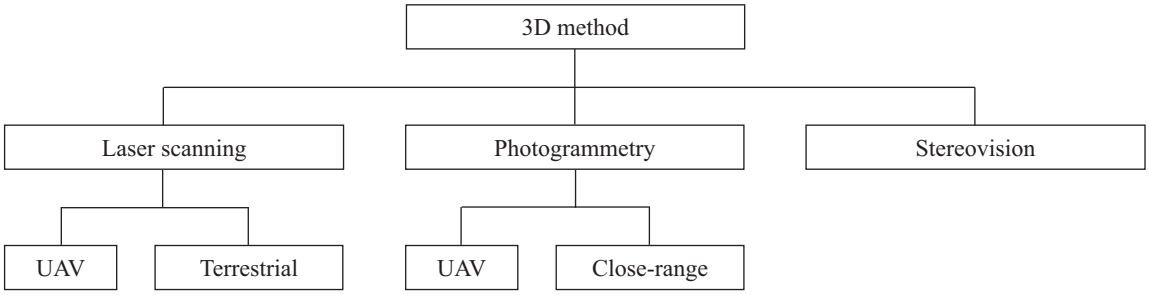



*Fig. 7*. A fraction of 3D reconstruction method

feature point between two views requires time consumption so it is being used for post-processing. For vehicle platform cameras, it is important to align the camera properly otherwise it will affect the quality of the outcome. Reference [46] reports the developed techniques for 3D road surface reconstruction in support of unpaved road assessment. By using a non-metric camera from the UAV platform, it captures multiple images of unpaved roads from an altitude of about 45 m above ground, with an image scale of approximately 1:9000. The ground resolution is about 5 mm. The UAV is travelling at 4 m/s, acquiring road images with 80 % overlap along the path. The road surface model is constructed from a combination of the matching results of feature points, normal image points and grid points following a coarse-to-fine hierarchical strategy. Some errors still exist in the 3D models, due to shadows and mismatches caused by the low greyscale variation of road surface and lack of texture.

In [47], an acquisition of 3D information of potholes features is easily carried out. Disparity calculation method is described by graph cut, belief propagation and dynamic programming. The disparity calculation method is carried out in three steps: matching cost computation, search range recalculation and disparity enhancement. The first method of a stereo-vision based technique is found in [48] and reported by [45]. A stereo pair of cameras is coupled with a structured light projector to get image cracks and potholes. The same research method is applied. The experiments are conducted by mounting the measurement system on a car. During the annual study, the accuracy in centimeters level was obtained. Another stereo system achieved a depth accuracy of 5 mm [49].

To cover the whole pavement width of 4 m, two stereo sets are used. In [50] a texture depth measurement is established that texturizes the road but no absolute measurement was assessed. Another study of stereo vision was reported in [51]. Study concentrates on defect detection but does not mention the geometry of measured defect which was the real objective of two calibrated camera setup. Reference [52] introduced a low-cost detection system using the same technique with infrared laser line projector and digital camera. The purpose of the camera is to capture a multi-view coplanar scheme as a patch and register colored point cloud from the image to the laser scanner point cloud. Reference [53] combined a 2D method with 3D reconstruction. It deduced the number of potholes by the 2D recognition process and validated the geometry of the defect with 3D reconstruction. The method is used in different ways by others, who dependently use point cloud data for recognition and geometry analysis. Thus, the low computational cost and acceleration data processing are guaranteed. Table 4 shows a technology solution classification of road distress detection. 3D laser scanning has highest spatial resolution with 1 mm accuracy.

Apart from the technologies of laser scanners and stereo vision cameras, a photogrammetric technique was reported in reference [2]. The photogrammetry method provides 3D reconstruction and 2D image correction. They are useful for detection purposes. When capturing multiple images, their orientation is applied for image matching to generate Orthophoto and DEM. Reference [55] covers up cracks analysis from an image. 3D model and 2D image format were used to perform analysis of potholes profile and orthophoto. Besides, 2 mm achievable accuracy from reconstruction method was presented in [49], it uses DHDV (Digital Highway Data Vehicle) developed by University of Arkansas and Way Link System Co. A 3D model of the road surface has been constructed from image resection. Tolerances of 1 mm accuracy were achieved in both longitudinal and transverse directions. The final pavement resolution images, which are captured from a speed above 100 km/h, yield good quality. It is a significant judge to have optimal distance from the camera to the road to compensate with such an optimal speed.

Mentioned above 3 methods of 3D reconstruction provide a point cloud-based data. Derived of the image-based point, the cloud is also able to characterize the texture of the road. After advancement of UAV technology, the aerial photogrammetry produces sensational road-mapping work. Nevertheless, terrestrial photogrammetry can be applied to the same objective. Many studies propose a photogrammetry method as a source of point cloud information of the interest features as well as mesh product analysis for the same purposes. In a revolutionary approach, an UAV mounted RGB camera has been used for the reconstruction of unpaved roads [46]. Mass production of micro-UAV provides inexpensive platform of data capture. The platform evolution for data capture from the land into aerial drastically changes the way of road defect detection. The photogrammetry technique starts a revolution in the mapping industry [56, 57] including the method of road mapping. Inexpensive and rugged UAV combination with high-resolution camera helps to get better output of high intensity of point cloud data. Two images captured from two different viewpoints are analyzed to derive the 3D information of the identified and matched feature points; hence the system is stereo in effect, although it has a monocular vision at any given point in

*Table 4.* Technology solution classification [54]

| Technology | Information | Precision | Accuracy | Spatial Resolutio, mm | Productivity | Cost | Automation |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Camera | 2D | Medium | Medium | 3–6 | High | Low | High |
| Linear scan camera | 2D | High | High | 2 | Medium | Medium | Medium |
| 3D laser imaging | 2D | High | High | 1 | High | High | Medium |
| Terrestrial Laser Scanner (TLS) | 2D | Very high | High | 3–6 | Medium | High | Low |

*Table 5.* Previous review on reconstruction method

| Reference | 3D Method | Proposed Techniques |
|---|---|---|
| [47] | Stereovision camera | Using stereo camera vision to create a disparity map, applied the surface fitting algorithm to estimate the road surface |
| [41] | LiDAR | Estimate road from point thinning then apply Multi-level Otsu thresholding to divide the intensity surface and apply convex hull for pothole polygonal creation |
| [46] | Aerial Photogrammetry | Image matching from combining the matching results of feature points, normal image points and grid points |
| [51] | Laser imaging | The distress measure in an image is calculated by accumulating the differences between adjacent histogram values |
| [44] | Stereovision camera | Stereovision camera for 3D Reconstruction |
| [45] | UAV with LiDAR attached | Features were extracted based on the strength of the point cloud elevations and reflection intensities |
| [59] | Photogrammetry | 2D image for detection and 3D reconstruction for measurement estimation |
| [40] | LiDAR and camera fusion using fully convolutional neural networks | An unstructured and sparse point cloud is first projected onto the camera image plane and then up sampled to obtain a set of dense 2D images encoding spatial information |
| [60] | Aerial Photogrammetry | Image stitching and DEM |
| [61] | Aerial Photogrammetry | Developed algorithm based from verticality value of point to automatically detect and measure road distress |

time. The reconstruction process is helped by collinearity equation from input of the relative displacement of the UAV movement by two on board sensors: a GPS and an inertial measurement unit [46]. In another work, aerial mapping for various features has questioned the state-of-art in the parameter set for each desired mapping feature. Various range accuracy is reported in the work [58]. Table 5 shows a previous study of 3D reconstruction method and how it works.

## Conclusion

Many proposed methods for pothole detection used image-based detection. The rough and coarser road surface is the simplest indicator to detect and analyze the road surface condition. By that indicator, an algorithm of machine learning is evolving rapidly today. The symbiont of this technique contributes to the complex development of the algorithm. Day by day a detection system adds on by hardware, software, or classifier algorithm application for better detection. The concern of pothole detection arises since it is a dangerous obstacle on the road. Difference in pothole detection techniques results in different outputs. However, the same objective is to address the existence of the pothole to alert road users. Each method has advantages and a significant impact.

## References


1. Buza E., Omanovic S., Huseinovic A. Pothole detection with image processing and spectral clustering. *Proc. of the 2nd International Conference on Information Technology and Computer Networks (ITCN '13)*, 2013.
2. Cao W., Liu Q., He Z. Review of pavement defect detection methods. *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 14531–14544. https://doi.org/10.1109/aCCESS.2020.2966881
3. Kim T., Ryu S.-K. Review and analysis of pothole detection methods. *Journal of Emerging Trends in Computing and Information Sciences*, 2014, vol. 5, no. 8, pp. 603–608.
4. Sarie F., Bisri M., Wicaksono A., Effendi R. Types of road pavement damage for road on peatland, a study case in Palangka Raya, Central Kalimantan, Indonesia. *Journal of Environmental Science, Toxicology and Food Technology*, 2015, vol. 9, no. 12, pp. 53–59. https://doi.org/10.9790/2402-091235359
5. Wang H.-W., Chen C.-H., Cheng D.-Y., Lin C.-H., Lo C.-C. A real-time pothole detection approach for intelligent transportation system. *Mathematical Problems in Engineering*, 2015, vol. 2015, pp. 869627. https://doi.org/10.1155/2015/869627
6. Mednis A., Strazdins G., Zviedris R., Kanonirs G., Selavo L. Real time pothole detection using Android smartphones with accelerometers. *Proc. of the 7th International Conference on*


## Литература


1. Buza E., Omanovic S., Huseinovic A. Pothole detection with image processing and spectral clustering // Proc. of the 2nd International Conference on Information Technology and Computer Networks (ITCN '13). 2013.
2. Cao W., Liu Q., He Z. Review of pavement defect detection methods // IEEE Access. 2020. V. 8. P. 14531–14544. https://doi.org/10.1109/aCCESS.2020.2966881
3. Kim T., Ryu S.-K. Review and analysis of pothole detection methods // Journal of Emerging Trends in Computing and Information Sciences. 2014. V. 5. N 8. P. 603–608.
4. Sarie F., Bisri M., Wicaksono A., Effendi R. Types of road pavement damage for road on peatland, a study case in Palangka Raya, Central Kalimantan, Indonesia // Journal of Environmental Science, Toxicology and Food Technology. 2015. V. 9. N 12. P. 53–59. https://doi.org/10.9790/2402-091235359
5. Wang H.-W., Chen C.-H., Cheng D.-Y., Lin C.-H., Lo C.-C. A real-time pothole detection approach for intelligent transportation system // Mathematical Problems in Engineering. 2015. V. 2015. P. 869627. https://doi.org/10.1155/2015/869627
6. Mednis A., Strazdins G., Zviedris R., Kanonirs G., Selavo L. Real time pothole detection using Android smartphones with accelerometers // Proc. of the 7th International Conference on

*Distributed Computing in Sensor Systems and Workshops (DCOSS)*, 2011, pp. 86376. https://doi.org/10.1109/DCOSS.2011.5982206
7. Gunawan F.E. Detecting road damages by using gyroscope sensor. *ICIC Express Letters*, 2018, vol. 12, no. 11, pp. 1089–1098. https://doi.org/10.24507/icicel.12.11.1089
8. Jamakhandi H.A., Srinivasa K.G. Internet of Things based real time mapping of road irregularities. *Proc. of International Conference on Circuits, Communication, Control and Computing (I4C)*, 2014, pp. 448–451 https://doi.org/10.1109/CIMCA.2014.7057842
9. Lei T., Mohamed A.A., Claudel C. An IMU-based traffic and road condition monitoring system. *HardwareX*, 2018, vol. 4, pp. e00045. https://doi.org/10.1016/j.ohx.2018.e00045
10. Strazdins G., Mednis A., Kanonirs G., Zviedris R., Selavo L. Towards vehicular sensor networks with android smartphones for road surface monitoring. *The Second International Workshop on Networks of Cooperating Objects (CONET'11), Electronic Proceedings of CPSWeek'11*, 2011, pp. 1-4.
11. Rau J.Y., Hsiao K.W., Jhan J.P., Wang S.H., Fang W.C., Wang J.L. Bridge crack detection using multi-rotary UAV and object-base image analysis. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences — ISPRS Archives*, 2017, vol. 42, no. 2W6, pp. 311–318. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W6-311-2017
12. Eriksson J., Girod L., Hull B., Newton R., Madden S., Balakrishnan H. The Pothole Patrol: Using a mobile sensor network for road surface monitoring. *MobiSys'08 — Proc. of the 6th International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services*, 2008, pp. 29–39. https://doi.org/10.1145/1378600.1378605
13. Chambon S., Moliard J.M. Automatic road pavement assessment with image processing: Review and comparison. *International Journal of Geophysics*, 2011, vol. 2011, pp. 989354. https://doi.org/10.1155/2011/989354
14. Pan Y., Zhang X., Cervone G., Yang L. Detection of asphalt pavement potholes and cracks based on the unmanned aerial vehicle multispectral imagery. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2018, vol. 11, no. 10, pp. 3701–3712. https://doi.org/10.1109/JSTARS.2018.2865528
15. Li M., Zang S., Zhang B., Li S., Wu C. A review of remote sensing image classification techniques: The role of Spatio-contextual information. *European Journal of Remote Sensing*, 2014, vol. 47, no. 1, pp. 389–411. https://doi.org/10.5721/EuJRS20144723
16. Qingju T., Jingmin D.A., Chunsheng L.I.U., Yuanlin L.I.U., Chunping R. Study on defects edge detection in infrared thermal image based on ant colony algorithm. *International Journal of Signal Processing, Image Processing and Pattern Recognition*, 2016, vol. 9, no. 4, pp. 121–130. http://dx.doi.org/10.14257/ijsip.2016.9.4.11
17. Luo Z.M., Wen J. The image segmentation algorithm of region growing and Wavelet Transform Modulus Maximum. *Proc. of the 5th International Conference on Instrumentation and Measurement, Computer, Communication, and Control (IMCCC)*, 2015, pp. 1171–1174. https://doi.org/10.1109/IMCCC.2015.251
18. Sultani W., Mokhtari S., Yun H. Automatic pavement object detection using superpixel segmentation combined with conditional random field. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2018, vol. 19, no. 7, pp. 2076–2085. https://doi.org/10.1109/TITS.2017.2728680
19. Koch C., Jog G.M., Brilakis I. Automated pothole distress assessment using asphalt pavement video data. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 2013, vol. 27, no. 4, pp. 370–378. https://doi.org/10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000232
20. Koch C., Brilakis I. Pothole detection in asphalt pavement images. *Advanced Engineering Informatics*, 2011, vol. 25, no. 3, pp. 507–515. https://doi.org/10.1016/j.aei.2011.01.002
21. Huang W., Zhang N. A novel road crack detection and identification method using digital image processing techniques. *Proc. of the 7th International Conference on Computing and Convergence Technology (ICCCT)*, 2012, pp. 397–400.
22. Gao M., Wang X., Zhu S., Guan P. Detection and segmentation of cement concrete pavement pothole based on image processing technology. *Mathematical Problems in Engineering*, 2020, pp. 1360832. https://doi.org/10.1155/2020/1360832
23. Paul A., Yang C., Breitkopf U., Liu Y., Wang Z., Rottensteiner F., Wallner M., Verworn A., Heipke C. Automatic classification of aerial imagery for urban hydrological applications. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information*

Distributed Computing in Sensor Systems and Workshops (DCOSS). 2011. P. 86376. https://doi.org/10.1109/DCOSS.2011.5982206
7. Gunawan F.E. Detecting road damages by using gyroscope sensor // ICIC Express Letters. 2018. V. 12. N 11. P. 1089–1098. https://doi.org/10.24507/icicel.12.11.1089
8. Jamakhandi H.A., Srinivasa K.G. Internet of Things based real time mapping of road irregularities // Proc. of International Conference on Circuits, Communication, Control and Computing (I4C). 2014. P. 448–451 https://doi.org/10.1109/CIMCA.2014.7057842
9. Lei T., Mohamed A.A., Claudel C. An IMU-based traffic and road condition monitoring system // HardwareX. 2018. V. 4. P. e00045. https://doi.org/10.1016/j.ohx.2018.e00045
10. Strazdins G., Mednis A., Kanonirs G., Zviedris R., Selavo L. Towards vehicular sensor networks with android smartphones for road surface monitoring // The Second International Workshop on Networks of Cooperating Objects (CONET'11), Electronic Proceedings of CPSWeek'11. 2011. P. 1-4.
11. Rau J.Y., Hsiao K.W., Jhan J.P., Wang S.H., Fang W.C., Wang J.L. Bridge crack detection using multi-rotary UAV and object-base image analysis // International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives. 2017. V. 42. N 2W6. P. 311–318. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W6-311-2017
12. Eriksson J., Girod L., Hull B., Newton R., Madden S., Balakrishnan H. The Pothole Patrol: Using a mobile sensor network for road surface monitoring // MobiSys'08 – Proc. of the 6th International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services. 2008. P. 29–39. https://doi.org/10.1145/1378600.1378605
13. Chambon S., Moliard J.M. Automatic road pavement assessment with image processing: Review and comparison // International Journal of Geophysics. 2011. V. 2011. P. 989354. https://doi.org/10.1155/2011/989354
14. Pan Y., Zhang X., Cervone G., Yang L. Detection of asphalt pavement potholes and cracks based on the unmanned aerial vehicle multispectral imagery // IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2018. V. 11. N 10. P. 3701–3712. https://doi.org/10.1109/JSTARS.2018.2865528
15. Li M., Zang S., Zhang B., Li S., Wu C. A review of remote sensing image classification techniques: The role of Spatio-contextual information // European Journal of Remote Sensing. 2014. V. 47. N 1. P. 389–411. https://doi.org/10.5721/EuJRS20144723
16. Qingju T., Jingmin D.A., Chunsheng L.I.U., Yuanlin L.I.U., Chunping R. Study on defects edge detection in infrared thermal image based on ant colony algorithm // International Journal of Signal Processing, Image Processing and Pattern Recognition. 2016. V. 9. N 4. P. 121–130. http://dx.doi.org/10.14257/ijsip.2016.9.4.11
17. Luo Z.M., Wen J. The image segmentation algorithm of region growing and Wavelet Transform Modulus Maximum // Proc. of the 5th International Conference on Instrumentation and Measurement, Computer, Communication, and Control (IMCCC). 2015. P. 1171–1174. https://doi.org/10.1109/IMCCC.2015.251
18. Sultani W., Mokhtari S., Yun H. Automatic pavement object detection using superpixel segmentation combined with conditional random field // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. 2018. V. 19. N 7. P. 2076–2085. https://doi.org/10.1109/TITS.2017.2728680
19. Koch C., Jog G.M., Brilakis I. Automated pothole distress assessment using asphalt pavement video data // Journal of Computing in Civil Engineering. 2013. V. 27. N 4. P. 370–378. https://doi.org/10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000232
20. Koch C., Brilakis I. Pothole detection in asphalt pavement images // Advanced Engineering Informatics. 2011. V. 25. N 3. P. 507–515. https://doi.org/10.1016/j.aei.2011.01.002
21. Huang W., Zhang N. A novel road crack detection and identification method using digital image processing techniques // Proc. of the 7th International Conference on Computing and Convergence Technology (ICCCT). 2012. P. 397–400.
22. Gao M., Wang X., Zhu S., Guan P. Detection and segmentation of cement concrete pavement pothole based on image processing technology // Mathematical Problems in Engineering. 2020. P. 1360832. https://doi.org/10.1155/2020/1360832
23. Paul A., Yang C., Breitkopf U., Liu Y., Wang Z., Rottensteiner F., Wallner M., Verworn A., Heipke C. Automatic classification of aerial imagery for urban hydrological applications // International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information

*Sciences — ISPRS Archives*, 2018, vol. 42, no. 3, pp. 1355–1362. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-3-1355-2018
24. Maas A., Alrajhi M., Alobeid A., Heipke C. Automatic classification of high resolution satellite imagery – A case study for urban areas in the Kingdom of Saudi Arabia. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences — ISPRS Archives*, 2017, vol. 42, no. 1W1, pp. 11–16. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-1-W1-11-2017
25. Jabari S., Fathollahi F., Zhang Y. Application of sensor fusion to improve UAV image classification. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences — ISPRS Archives*, 2017, vol. 42, no. 2W6, pp. 153–156. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W6-153-2017
26. Jawak S.D., Wankhede S.F., Luis A.J. Comparison of pixel and object-based classification techniques for glacier facies extraction. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences — ISPRS Archives*, 2018, vol. 42, no. 5, pp. 543–548. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-xlii-5-543-2018
27. Verma A.K., Garg P.K., Prasad K.S.H., Dadhwal V.K. Classification of LISS IV imagery using decision tree methods. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences — ISPRS Archives*, 2016, vol. 41, pp. 1061–1066. https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XLI-B8-1061-2016
28. Saini R., Ghosh S.K. Crop classification on single date sentinel-2 imagery using random forest and suppor vector machine. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences — ISPRS Archives*, 2018, vol. 42, no. 5, pp. 683–688. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-xlii-5-683-2018
29. Shaharum N.S.N., Shafri H.Z.M., Ghani W.A.W.A., Samsatli S., Yusuf B., Al-Habshi M.M.A., Prince H.M. Image classification for mapping oil palm distribution via support vector machine using scikit-learn module. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences — ISPRS Archives*, 2018, vol. 42, no. 4/W9, pp. 139–145. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-4-W9-133-2018
30. Kamavisdar P., Saluja S., Agrawal S. A survey on image classification approaches and techniques. *International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering*, 2013, vol. 2, no. 1, pp. 1005–1009.
31. Abdellatif M., Peel H., Cohn A.G., Fuentes R. Hyperspectral imaging for autonomous inspection of road pavement defects. *Proc. of the 36th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC)*, 2019, pp. 384–392. https://doi.org/10.22260/isarc2019/0052
32. Jengo C.M., Hughes D., LaVeigne J.D., Curtis I. Pothole detection and road condition assessment using hyperspectral imager. *Proc. of the Annual Conference "Geospatial Goes Global: From Your Neighborhood to the Whole Planet"*, 2005, pp. 461–473.
33. Branco L.H.C., Segantine P.C.L. MaNIAC-UAV — A methodology for automatic pavement defects detection using images obtained by Unmanned Aerial Vehicles. *Journal of Physics: Conference Series*, 2015, vol. 633, no. 1, pp. 012122. https://doi.org/10.1088/1742-6596/633/1/012122
34. Herold M., Roberts D., Smadi O., Noronh V. *Road condition mapping with hyperspectral remote sensing*. Available at: https://www.ugpti.org/smartse/research/citations/downloads/Herold-Road_Condition_Mapping_with_HSI-2004.pdf (accessed: 30.12.2021)
35. Pascucci S., Bassani C., Palombo A., Poscolieri M., Cavalli R. Road asphalt pavements analyzed by airborne thermal remote sensing: Preliminary results of the venice highway. *Sensors*, 2008, vol. 8, no. 2, pp. 1278–1296. https://doi.org/10.3390/s8021278
36. Shahi K., Shafri H.Z.M., Taherzadeh E., Mansor S., Muniandy R. A novel spectral index to automatically extract road networks from WorldView-2 satellite imagery. *Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 2015, vol. 18, no. 1, pp. 27–33. https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2014.12.003
37. Pan Y., Zhang X., Sun M., Zhao Q. Object-based and supervised detection of potholes and cracks from the pavement images acquired by UAV. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences — ISPRS Archives*, 2017, vol. 42, no. 4W4, pp. 209–217. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-4-W4-209-2017
38. Resende M.R., Bernucci L.L.B., Quintanilha J.A. Monitoring the condition of roads pavement surfaces: proposal of methodology using hyperspectral images. *Journal of Transport Literature*, 2014, vol. 8, no. 2, pp. 201–220. https://doi.org/10.1590/s2238-10312014000200009

Sciences — ISPRS Archives. 2018. V. 42. N 3. P. 1355–1362. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-3-1355-2018
24. Maas A., Alrajhi M., Alobeid A., Heipke C. Automatic classification of high resolution satellite imagery – A case study for urban areas in the Kingdom of Saudi Arabia // International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences — ISPRS Archives. 2017. V. 42. N 1W1. P. 11–16. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-1-W1-11-2017
25. Jabari S., Fathollahi F., Zhang Y. Application of sensor fusion to improve UAV image classification // International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences — ISPRS Archives. 2017. V. 42. N 2W6. P. 153–156. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W6-153-2017
26. Jawak S.D., Wankhede S.F., Luis A.J. Comparison of pixel and object-based classification techniques for glacier facies extraction // International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences — ISPRS Archives. 2018. V. 42. N 5. P. 543–548. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-xlii-5-543-2018
27. Verma A.K., Garg P.K., Prasad K.S.H., Dadhwal V.K. Classification of LISS IV imagery using decision tree methods // International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences — ISPRS Archives. 2016. V. 41. P. 1061–1066. https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XLI-B8-1061-2016
28. Saini R., Ghosh S.K. Crop classification on single date sentinel-2 imagery using random forest and suppor vector machine // International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences — ISPRS Archives. 2018. V. 42. N 5. P. 683–688. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-xlii-5-683-2018
29. Shaharum N.S.N., Shafri H.Z.M., Ghani W.A.W.A., Samsatli S., Yusuf B., Al-Habshi M.M.A., Prince H.M. Image classification for mapping oil palm distribution via support vector machine using scikit-learn module // International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences — ISPRS Archives. 2018. V. 42. N 4/W9. P. 139–145. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-4-W9-133-2018
30. Kamavisdar P., Saluja S., Agrawal S. A survey on image classification approaches and techniques // International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering. 2013. V. 2. N 1. P. 1005–1009.
31. Abdellatif M., Peel H., Cohn A.G., Fuentes R. Hyperspectral imaging for autonomous inspection of road pavement defects // Proc. of the 36th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC). 2019. P. 384–392. https://doi.org/10.22260/isarc2019/0052
32. Jengo C.M., Hughes D., LaVeigne J.D., Curtis I. Pothole detection and road condition assessment using hyperspectral imager // Proc. of the Annual Conference "Geospatial Goes Global: From Your Neighborhood to the Whole Planet". 2005. P. 461–473.
33. Branco L.H.C., Segantine P.C.L. MaNIAC-UAV — A methodology for automatic pavement defects detection using images obtained by Unmanned Aerial Vehicles // Journal of Physics: Conference Series. 2015. V. 633. N 1. P. 012122. https://doi.org/10.1088/1742-6596/633/1/012122
34. Herold M., Roberts D., Smadi O., Noronh V. Road condition mapping with hyperspectral remote sensing [Электроный ресурс]. URL: https://www.ugpti.org/smartse/research/citations/downloads/Herold-Road_Condition_Mapping_with_HSI-2004.pdf (дата обращения: 30.12.2021)
35. Pascucci S., Bassani C., Palombo A., Poscolieri M., Cavalli R. Road asphalt pavements analyzed by airborne thermal remote sensing: Preliminary results of the venice highway // Sensors. 2008. V. 8. N 2. P. 1278–1296. https://doi.org/10.3390/s8021278
36. Shahi K., Shafri H.Z.M., Taherzadeh E., Mansor S., Muniandy R. A novel spectral index to automatically extract road networks from WorldView-2 satellite imagery // Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science. 2015. V. 18. N 1. P. 27–33. https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2014.12.003
37. Pan Y., Zhang X., Sun M., Zhao Q. Object-based and supervised detection of potholes and cracks from the pavement images acquired by UAV // International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences – ISPRS Archives. 2017. V. 42. N 4W4. P. 209–217. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-4-W4-209-2017
38. Resende M.R., Bernucci L.L.B., Quintanilha J.A. Monitoring the condition of roads pavement surfaces: proposal of methodology using hyperspectral images // Journal of Transport Literature. 2014. V. 8. N 2. P. 201–220. https://doi.org/10.1590/s2238-10312014000200009

39. Raziq A., Xu A., Li Y., Zhao X. Extraction of urban road network from multispectral images using multivariate kernel statistic and segmentation method. *Geoinformatics & Geostatistics: An Overview*, 2017, vol. 5, no. 1. https://doi.org/10.4172/2327-4581.1000158
40. Caltagirone L., Bellone M., Svensson L., Wahde M. LiDAR–camera fusion for road detection using fully convolutional neural networks. *Robotics and Autonomous Systems*, 2019, vol. 111, pp. 125–131. https://doi.org/10.1016/j.robot.2018.11.002
41. Kumar P., Angelats E. An automated road roughness detection from mobile laser scanning data. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences — ISPRS Archives*, 2017, vol. 42, no. 1W1, pp. 91–96. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-1-W1-91-2017
42. Walters R.C., Jaselskis E. Using scanning lasers for real-time pavement thickness measurement. *Proc. of the 2005 ASCE International Conference on Computing in Civil Engineering*, 2005, pp. 375–385. https://doi.org/10.1061/40794(179)36
43. Yu S.J., Sukumar S.R., Koschan A.F., Page D.L., Abidi M.A. 3D reconstruction of road surfaces using an integrated multi-sensory approach. *Optics and Lasers in Engineering*, 2007, vol. 45, no. 7, pp. 808–818. https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2006.12.007
44. Li Q., Yao M., Yao X., Yu W., Xu B. A real-time 3D scanning system for pavement rutting and pothole detections. *Proceedings of SPIE*, 2009, vol. 7447, pp. 74470B. https://doi.org/10.1117/12.824559
45. Mathavan S., Kamal K., Rahman M. A review of three-dimensional imaging technologies for pavement distress detection and measurements. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2015, vol. 16, no. 5, pp. 2353–2362. https://doi.org/10.1109/TITS.2015.2428655
46. Zhang C., Elaksher A. 3D Reconstruction from UAV-acquired Imagery for Road Surface Distress Assessment. *Proc. of the 31st Asian Conference on Remote Sensing (ACRS)*, 2010, pp. 386–391.
47. Zhang A., Wang K.C.P., Li B., Yang E., Dai X., Peng Y., Fei Y., Liu Y., Li J.Q., Chen C. Automated pixel-level pavement crack detection on 3D asphalt surfaces using a deep-learning network. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2017, vol. 32, no. 10, pp. 805–819. https://doi.org/10.1111/mice.12297
48. Kertesz I., Lovas T., Barsi A. Measurement of road roughness by low-cost photogrammetric system. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences — ISPRS Archives*, 2007, vol. 36, no. 5/C55, pp. 4.
49. Hou Z., Wang K.C.P., Gong W. Experimentation of 3D pavement imaging through stereovision. *Proc. of the International Conference on Transportation Engineering (ICTE)*, 2007, pp. 376–381. https://doi.org/10.1061/40932(246)62
50. El Gendy A., Shalaby A., Saleh M., Flintsch G.W. Stereo-vision applications to reconstruct the 3D texture of pavement surface. *International Journal of Pavement Engineering*, 2011, vol. 12, no. 3, pp. 263–273. https://doi.org/10.1080/10298436.2010.546858
51. Yu X., Salari E. Pavement pothole detection and severity measurement using laser imaging. *Proc. of the IEEE International Conference on Electro Information Technology*, 2011, pp. 5978573. https://doi.org/10.1109/EIT.2011.5978573
52. Jokela M., Kutila M., Le L. Road condition monitoring system based on a stereo camera. *Proc. of the IEEE 5th International Conference on Intelligent Computer Communication and Processing (ICCP)*, 2009, pp. 423–428. https://doi.org/10.1109/ICCP.2009.5284724
53. Tan Y., Li Y. UAV photogrammetry-based 3D road distress detection. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2019, vol. 8, no. 9, pp. 409. https://doi.org/10.3390/ijgi8090409
54. Ragnoli A., de Blasiis M.R., Di Benedetto A. Pavement distress detection methods: A review. *Infrastructures*, 2018, vol. 3, no. 4, pp. 58. https://doi.org/10.3390/infrastructures3040058
55. Wang X., Al-Shabbani Z., Sturgill R., Kirk A., Dadi G.B. Estimating earthwork volumes through use of unmanned aerial systems. *Transportation Research Record*, 2017, vol. 2630, pp. 1–8. https://doi.org/10.3141/2630-01
56. Tahar K.N., Ahmad A., Akib W.A.A.W.M., Mohd W.M.N.W. A generic approach for photogrammetric survey using a six-rotor unmanned aerial vehicle. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2014, vol. 18, no. 1, pp. 012003 https://doi.org/10.1088/1755-1315/18/1/012003
57. Abd Mukti S.N., Tahar K.N. Low altitude photogrammetry for urban road mapping. *Built Environment Journal*, 2021, vol. 18, no. 1, pp. 31. https://doi.org/10.24191/bej.v18i1.10205



39. Raziq A., Xu A., Li Y., Zhao X. Extraction of urban road network from multispectral images using multivariate kernel statistic and segmentation method // Geoinformatics & Geostatistics: An Overview. 2017. V. 5. N 1. https://doi.org/10.4172/2327-4581.1000158
40. Caltagirone L., Bellone M., Svensson L., Wahde M. LiDAR–camera fusion for road detection using fully convolutional neural networks // Robotics and Autonomous Systems. 2019. V. 111. P. 125–131. https://doi.org/10.1016/j.robot.2018.11.002
41. Kumar P., Angelats E. An automated road roughness detection from mobile laser scanning data // International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences — ISPRS Archives. 2017. V. 42. N 1W1. P. 91–96. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-1-W1-91-2017
42. Walters R.C., Jaselskis E. Using scanning lasers for real-time pavement thickness measurement // Proc. of the 2005 ASCE International Conference on Computing in Civil Engineering. 2005. P. 375–385. https://doi.org/10.1061/40794(179)36
43. Yu S.J., Sukumar S.R., Koschan A.F., Page D.L., Abidi M.A. 3D reconstruction of road surfaces using an integrated multi-sensory approach // Optics and Lasers in Engineering. 2007. V. 45. N 7. P. 808–818. https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2006.12.007
44. Li Q., Yao M., Yao X., Yu W., Xu B. A real-time 3D scanning system for pavement rutting and pothole detections // Proceedings of SPIE. 2009. V. 7447. P. 74470B. https://doi.org/10.1117/12.824559
45. Mathavan S., Kamal K., Rahman M. A review of three-dimensional imaging technologies for pavement distress detection and measurements // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. 2015. V. 16. N 5. P. 2353–2362. https://doi.org/10.1109/TITS.2015.2428655
46. Zhang C., Elaksher A. 3D Reconstruction from UAV-acquired Imagery for Road Surface Distress Assessment // Proc. of the 31st Asian Conference on Remote Sensing (ACRS). 2010. P. 386–391.
47. Zhang A., Wang K.C.P., Li B., Yang E., Dai X., Peng Y., Fei Y., Liu Y., Li J.Q., Chen C. Automated pixel-level pavement crack detection on 3D asphalt surfaces using a deep-learning network // Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering. 2017. V. 32. N 10. P. 805–819. https://doi.org/10.1111/mice.12297
48. Kertesz I., Lovas T., Barsi A. Measurement of road roughness by low-cost photogrammetric system // International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences — ISPRS Archives. 2007. V. 36. N 5/C55. P. 4.
49. Hou Z., Wang K.C.P., Gong W. Experimentation of 3D pavement imaging through stereovision // Proc. of the International Conference on Transportation Engineering (ICTE). 2007. P. 376–381. https://doi.org/10.1061/40932(246)62
50. El Gendy A., Shalaby A., Saleh M., Flintsch G.W. Stereo-vision applications to reconstruct the 3D texture of pavement surface // International Journal of Pavement Engineering. 2011. V. 12. N 3. P. 263–273. https://doi.org/10.1080/10298436.2010.546858
51. Yu X., Salari E. Pavement pothole detection and severity measurement using laser imaging // Proc. of the IEEE International Conference on Electro Information Technology. 2011. P. 5978573. https://doi.org/10.1109/EIT.2011.5978573
52. Jokela M., Kutila M., Le L. Road condition monitoring system based on a stereo camera // Proc. of the IEEE 5th International Conference on Intelligent Computer Communication and Processing (ICCP). 2009. P. 423–428. https://doi.org/10.1109/ICCP.2009.5284724
53. Tan Y., Li Y. UAV photogrammetry-based 3D road distress detection // ISPRS International Journal of Geo-Information. 2019. V. 8. N 9. P. 409. https://doi.org/10.3390/ijgi8090409
54. Ragnoli A., de Blasiis M.R., Di Benedetto A. Pavement distress detection methods: A review // Infrastructures. 2018. V. 3. N 4. P. 58. https://doi.org/10.3390/infrastructures3040058
55. Wang X., Al-Shabbani Z., Sturgill R., Kirk A., Dadi G.B. Estimating earthwork volumes through use of unmanned aerial systems // Transportation Research Record. 2017. V. 2630. P. 1–8. https://doi.org/10.3141/2630-01
56. Tahar K.N., Ahmad A., Akib W.A.A.W.M., Mohd W.M.N.W. A generic approach for photogrammetric survey using a six-rotor unmanned aerial vehicle // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2014. V. 18. N 1. P. 012003 https://doi.org/10.1088/1755-1315/18/1/012003
57. Abd Mukti S.N., Tahar K.N. Low altitude photogrammetry for urban road mapping // Built Environment Journal. 2021. V. 18. N 1. P. 31. https://doi.org/10.24191/bej.v18i1.10205

58. Slimane A.B., Khoudeir M., Brochard J., Do M.T. Characterization of road microtexture by means of image analysis. *Wear*, 2008, vol. 264, no. 5–6, pp. 464–468. https://doi.org/10.1016/j.wear.2006.08.045
59. Jog G.M., Koch C., Golparvar-Fard M., Brilakis I. Pothole properties measurement through visual 2D recognition and 3D reconstruction. *Proc. of the ASCE International Conference on Computing in Civil Engineering*, 2012, pp. 553–560. https://doi.org/10.1061/9780784412343.0070
60. Saad A.M., Tahar K.N. Identification of rut and pothole by using multirotor unmanned aerial vehicle (UAV). *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 2019, vol. 137, pp. 647–654. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.01.093
61. Biçici S., Zeybek M. An approach for the automated extraction of road surface distress from a UAV-derived point cloud. *Automation in Construction*, 2021, vol. 122, pp. 103475. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103475

58. Slimane A.B., Khoudeir M., Brochard J., Do M.T. Characterization of road microtexture by means of image analysis // Wear. 2008. V. 264. N 5–6. P. 464–468. https://doi.org/10.1016/j.wear.2006.08.045
59. Jog G.M., Koch C., Golparvar-Fard M., Brilakis I. Pothole properties measurement through visual 2D recognition and 3D reconstruction // Proc. of the ASCE International Conference on Computing in Civil Engineering. 2012. P. 553–560. https://doi.org/10.1061/9780784412343.0070
60. Saad A.M., Tahar K.N. Identification of rut and pothole by using multirotor unmanned aerial vehicle (UAV) // Measurement: Journal of the International Measurement Confederation. 2019. V. 137. P. 647–654. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.01.093
61. Biçici S., Zeybek M. An approach for the automated extraction of road surface distress from a UAV-derived point cloud // Automation in Construction. 2021. V. 122. P. 103475. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103475

## Authors

**Shahrul N. Abd Mukti** — PhD, Senior Surveyor, Dewan Bandaraya Kuala Lumpur, Kuala Lumpur, 50350, Malaysia, https://orcid.org/0000-0002-0498-0654, shahrulnizan58@gmail.com
**Khairul N. Tahar** — PhD, Associate Professor, Universiti Teknologi MARA (UiTM), Shah Alam, 40450, Malaysia, SC 38362352000, https://orcid.org/0000-0003-2065-7993, nizamtahar@gmail.com

## Авторы

**Абд Мукти Шахрул Низан** — PhD, старший геодезист, Администрация Куала-Лумпура, Куала-Лумпур, 50350, Малайзия, https://orcid.org/0000-0002-0498-0654, shahrulnizan58@gmail.com
**Тахар Хайрул Низам** — PhD, доцент, Технологический университет MARA (UiTM), Шах-Алам, 40450, Малайзия, SC 38362352000, https://orcid.org/0000-0003-2065-7993, nizamtahar@gmail.com

*Received 10.03.2022*
*Approved after reviewing 14.04.2022*
*Accepted 30.05.2022*

*Статья поступила в редакцию 10.03.2022*
*Одобрена после рецензирования 14.04.2022*
*Принята к печати 30.05.2022*

Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ
май–июнь 2022 Том 22 № 3 http://ntv.ifmo.ru/
SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL OF INFORMATION TECHNOLOGIES, MECHANICS AND OPTICS
May–June 2022 Vol. 22 No 3 http://ntv.ifmo.ru/en/
ISSN 2226-1494 (print) ISSN 2500-0373 (online)

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК УНИВЕРСИТЕТ ИТМО
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ

## АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ И РОБОТОТЕХНИКА

## AUTOMATIC CONTROL AND ROBOTICS

doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-3-472-479
УДК 681.5.013

# Адаптивное управление нелинейным объектом с несогласованными параметрическими неопределенностями и ограничением на входное воздействие

**Артем Витальевич Пашенко[1]✉, Дмитрий Николаевич Герасимов[2], Алексей Владимирович Парамонов[3], Владимир Олегович Никифоров[4]**

[1,2,3,4] Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

[1] ar.vi.pashenko@gmail.com✉, https://orcid.org/0000-0002-9461-8180
[2] dngerasimov@itmo.ru, https://orcid.org/0000-0001-8306-4138
[3] avparamonov@itmo.ru, https://orcid.org/0000-0002-6355-0670
[4] nikiforov_vo@itmo.ru, https://orcid.org/0000-0003-4860-5407

**Аннотация**

**Предмет исследования.** Рассмотрена задача адаптивного управления параметрически неопределенным нелинейным объектом, представленным в параметризованной форме с несогласованными неопределенностями и ограничением на величину входного воздействия. **Метод.** Решение задачи основано на использовании процедуры адаптивного бэкстеппинга, виртуальные управления в которой зависят от старших производных настраиваемых параметров, рассчитанных с помощью алгоритма адаптации с улучшенной параметрической сходимостью. Выполнен аналитический синтез управления с компенсацией влияния ограничений на управление с применением специального фильтра. **Основные результаты.** Представленный подход позволяет синтезировать адаптивный регулятор для обеспечения ограниченности всех сигналов в замкнутой системе и слежения за задающим сигналом. Приведенные результаты моделирования в среде MATLAB/Simulink продемонстрировали работу подхода и ускорение параметрической настройки при повышении коэффициента адаптации. **Практическая значимость.** Рассмотренный класс объектов описывает широкий спектр систем, таких как манипуляционные роботы, технологические процессы на производстве, электромагнитные системы с эффектом левитации, химические процессы и др. Предложенный алгоритм управления учитывает естественные в практических приложениях ограничения на входное воздействие и существенно снижает влияние скорости настройки параметров регулятора на переходные процессы системы управления.

**Ключевые слова**

адаптивное управление, бэкстеппинг, нелинейный объект, ограничение на управление, улучшенная параметрическая настройка

**Благодарности**

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-31-90103.

**Ссылка для цитирования:** Пашенко А.В., Герасимов Д.Н., Парамонов А.В., Никифоров В.О. Адаптивное управление нелинейным объектом с несогласованными параметрическими неопределенностями и ограничением на входное воздействие // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2022. Т. 22, № 3. С. 472–479. doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-3-472-479

# Adaptive control of nonlinear plant with unmatched parametric uncertainties and input saturation

**Artem V. Pashenko[1]✉, Dmitry N. Gerasimov[2], Aleksei V. Paramonov[3], Vladimir O. Nikiforov[4]**

[1,2,3,4] ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

[1] ar.vi.pashenko@gmail.com✉, https://orcid.org/0000-0002-9461-8180
[2] dngerasimov@itmo.ru, https://orcid.org/0000-0001-8306-4138
[3] avparamonov@itmo.ru, https://orcid.org/0000-0002-6355-0670
[4] nikiforov_vo@itmo.ru, https://orcid.org/0000-0003-4860-5407

© Пашенко А.В., Герасимов Д.Н., Парамонов А.В., Никифоров В.О., 2022

**Abstract**
The problem of adaptive control of a parametrically uncertain nonlinear plant presented in a state-feedback form with unmatched uncertainties and input constraint is considered. The solution is based on adaptive backstepping procedure, in which the virtual controls includes the high-order time derivatives of adjustable parameters calculated with the use of an adaptation algorithm with improved parametric convergence. Analytical design of control with compensation for the influence of input constraints is performed using of a special filter. The approach presented in this paper allows one to design an adaptive controller that ensures the boundedness for all signals in the closed-loop system and provides tracking of the reference signal. Simulation results presented in the MATLAB/Simulink environment illustrate the performance of the presented approach and the acceleration of parametric convergence with an increase of the adaptation coefficient. The plant considered in this work describes a wide class of systems, such as various manipulation robots, technological processes, electromagnetic levitation systems, chemical processes, etc. The proposed control algorithm considers natural for practical applications input constraints and significantly reduces the influence of the regulator parameters tuning speed on the control system transient processes.

**Keywords**
adaptive control, backstepping, nonlinear object, input saturation, input constraint, improved parametric tuning

**Aknowledgements**
The reported study was funded by RFBR according to the research project № 20-31-90103.

**For citation:** Pashenko A.V., Gerasimov D.N., Paramonov A.V., Nikiforov V.O. Adaptive control of nonlinear plant with unmatched parametric uncertainties and input saturation. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2022, vol. 22, no. 3, pp. 472–479 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-3-472-479

## Введение

Рассматривается задача адаптивного управления классом нелинейных каскадных систем с несогласованными параметрическими неопределенностями и ограничением на управляющее воздействие.

Впервые решение задачи адаптивного управления данным классом систем было предложено более двадцати лет назад в работе [1] и основывалось на итеративной процедуре синтеза (бэкстеппинге). Однако ввиду избыточного количества настраиваемых параметров регулятора предложенное решение не получило широкого распространения. Несколько лет спустя проблема избыточной параметризации была решена в работах [2, 3] двумя способами: за счет использования функций настройки («*tuning functions*») и модульных идентификаторов («*modular identifiers*»). Использование функций настройки позволяет устранить влияние скорости настройки параметров регулятора на переходные процессы ошибки управления, но в этом случае выбор алгоритма адаптации зависит от функции Ляпунова, применение которой ограничивает его выбор. Использование модульных идентификаторов, с одной стороны, позволило разрешить проблему достаточно свободного выбора алгоритма адаптации за счет независимого (модульного) синтеза алгоритмов управления и адаптации. С другой стороны, ошибка управления в полученной системе стала зависеть от скорости настройки параметров регулятора, что привело к сильным «всплескам» ошибок в начальные моменты времени при больших коэффициентах адаптации.

В целях устранения недостатка метода модульных идентификаторов в работе [4] предложено использование алгоритма адаптации высокого порядка [5], с помощью которого выполнен расчет старших производных настраиваемых параметров. Представленное решение позволило устранить негативное влияние скорости настройки параметров регулятора на ошибку управления, однако свойства алгоритма адаптации высокого порядка не позволяют произвольно увеличивать скорость самой настройки [6]. В связи с этим в работах [7, 9] был предложен алгоритм адаптации с улучшенной параметрической сходимостью на базе схемы Крейссельмейера [10]. Алгоритм позволил ускорить параметрическую настройку регулятора за счет увеличения коэффициента адаптации без существенных «всплесков» ошибки управления.

В настоящей работе представлено расширение предложенного в работе [9] решения задачи адаптивного управления параметрически неопределенными объектами на случай ограничения по управлению.

## Постановка задачи

Рассмотрим объект, представленный в каскадной форме[1]

$$\dot{x}_i = x_{i+1} + \mathbf{f}_i^T(x_1, x_2, \ldots, x_i)\boldsymbol{\theta},\ i = \overline{1, n-1}, \tag{1}$$

$$\dot{x}_n = \mathbf{f}_n^T(\mathbf{x})\boldsymbol{\theta} + \beta(\mathbf{x})v(u), \tag{2}$$

$$y = x_1, \tag{3}$$

где $x_i$ — компоненты доступного к измерению вектора состояния $\mathbf{x} \in R^n$; $y \in R$ — регулируемая переменная; $\boldsymbol{\theta} \in R^q$ — вектор неизвестных параметров; $\beta(\mathbf{x}) \in R$ и $\mathbf{f}_i \in R^q$ — непрерывные нелинейные функции[2], такие, что $\beta(\mathbf{x})$ отделена от нуля положительной константой $b_0$, т. е. $\beta(\mathbf{x}) \geq b_0 > 0$, $\forall \mathbf{x}$; $u \in R$ — управляющее воздействие; $v(u)$ — ограниченное управляющее воздействие, определяемое как

$$v(u) = sat(u) = \begin{cases} sign(u)u_M & |u| \geq u_M, \\ u & |u| < u_M, \end{cases} \tag{4}$$

где $u_M > 0$ — известная константа.

[1] Здесь и далее верхним индексом «$T$» обозначается операция транспонирования вектора или матрицы.

[2] Здесь и далее аргументы функций $\mathbf{f}_i$ и $\beta$ будут опущены для простоты записи, кроме тех случаев, когда они необходимы для понимания.

Задача состоит в:

— синтезе алгоритма адаптивного управления, гарантирующего ограниченность всех сигналов в замкнутой системе и выполнение целевого равенства

$$\lim_{t\to\infty}\varepsilon(t) = \lim_{t\to\infty}(y(t) - r(t)) = 0, \quad (5)$$

где $r(t)$ — ограниченный достаточно гладкий сигнал задания с ограниченными $n$ первыми производными, $\varepsilon$ — ошибка управления;

— обеспечении возможности ускорения параметрической настройки регулятора и, как следствие, увеличения быстродействия замкнутой системы посредством увеличения коэффициента адаптации.

Сформулированная задача управления решается при следующих допущениях.

**Допущение 1.** Для объекта (1)–(3) выполняется условие

$$-u_M \le u^*(t) \le u_M, \quad \forall t \ge T_0, \quad (6)$$

где $u^*(t) = u(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{x}(t), r(t), t)$ — гарантирующий цель (5) неадаптивный закон управления, синтезированный предложенным в настоящей работе способом при условии, что параметры объекта $\boldsymbol{\theta}$ известны, $T_0$ — время настройки системы. □

**Допущение 2.** Состояние объекта (1)–(3) ограничено при ограниченном входе. □

*Допущение 1* является естественным для большинства практических задач и означает, что сформулированная цель асимптотического слежения достижима с помощью управления, лежащего внутри заданных пределов (6) для фактических значений неизвестных параметров $\boldsymbol{\theta}$ и заданного сигнала задания $r(t)$. *Допущение 2* — стандартное для задач управления с ограничением [11–13].

## Адаптивное управление

Введем в рассмотрение фильтр [14][1]

$$\dot\lambda_i = -\lambda_{i-1} - (c_i + s_i)\lambda_i + \lambda_{i+1},\ i = \overline{1, n-1}, \quad (7)$$

$$\dot\lambda_n = -\lambda_{n-1} - (c_n + s_n)\lambda_n + \beta(\mathbf{x})\Delta u, \quad (8)$$

где $\lambda_i$ — компоненты вектора состояния фильтра; $c_i$ — положительные константы; $s_i$ — демпфирующие члены, вид которых определен ниже; $\Delta u(u) = v(u) - u$. Начальные условия фильтра $\lambda_i(0)$ приняты нулевыми.

Применим итеративную процедуру адаптивного бэкстеппинга [4, 9], состоящую из $n$ шагов, на каждом из которых формируется виртуальное управление (стабилизирующая функция):

$$\alpha_1 = -(c_1 + s_1)\varepsilon - \boldsymbol{\omega}_1{}^T\hat{\boldsymbol{\theta}}, \quad (9)$$

$$\alpha_i = -(x_{i-1} - r^{(i-2)} - \alpha_{i-2}) - (c_i + s_i)(x_i - r^{(i-1)} - \alpha_{i-1}) + \sum_{j=1}^{i-1}\left[\frac{\partial\alpha_{i-1}}{\partial x_j}x_{j+1} + \frac{\partial\alpha_{i-1}}{\partial r^{(j-1)}}r^{(j)} + \frac{\partial\alpha_{i-1}}{\partial\hat{\boldsymbol{\theta}}^{(j-1)}}\hat{\boldsymbol{\theta}}^{(j)}\right] - \boldsymbol{\omega}_i{}^T\hat{\boldsymbol{\theta}}, \quad (10)$$

$$i = \overline{2, n},$$

где $\hat{\boldsymbol{\theta}}$ — оценки неизвестных параметров $\boldsymbol{\theta}$,

$$\boldsymbol{\omega}_i = \mathbf{f}_i - \sum_{j=1}^{i-1}\frac{\partial\alpha_{j-1}}{\partial x_j}\mathbf{f}_j, \quad (11)$$

$$s_i = d_i\|\boldsymbol{\omega}_i\|^2, \quad (12)$$

$d_i$ — положительные константы.

Рассчитаем фактическое управление:

$$u = \frac{1}{\beta(\mathbf{x})}(\alpha_n + r^{(n)}). \quad (13)$$

**Лемма 1.** Фильтр (7), (8) и настраиваемый закон управления (9)–(13) вместе с объектом (1)–(3) образуют модель ошибки замкнутой системы

$$\dot{\mathbf{z}} = \mathbf{A}_z\mathbf{z} + \mathbf{B}_z\tilde{\boldsymbol{\theta}}, \quad (14)$$

$$\varepsilon = z_1 + \lambda_1, \quad (15)$$

где $\tilde{\boldsymbol{\theta}} = \boldsymbol{\theta} - \hat{\boldsymbol{\theta}}$ — ошибка оценки неизвестных параметров, $\mathbf{z} = [z_1 \quad z_2 \quad \dots \quad z_n]^T$ — вектор состояния модели ошибки с компонентами

$$z_1 = \varepsilon - \lambda_1, \quad z_i = x_i - r^{(i-1)} - \alpha_{i-1} - \lambda_i, \quad i = \overline{2, n}, \quad (16)$$

$$\mathbf{A}_z = \begin{bmatrix} -(c_1+s_1) & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ -1 & -(c_2+s_2) & 1 & \ddots & 0 \\ 0 & -1 & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & 1 \\ 0 & 0 & \cdots & -1 & -(c_n+s_n) \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{B}_z = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\omega}_1{}^T \\ \boldsymbol{\omega}_2{}^T \\ \vdots \\ \boldsymbol{\omega}_n{}^T \end{bmatrix}. \quad \square$$

*Лемма 1* доказывается путем расчета производных $\dot z_i$ с учетом (16) и (9)–(13). *Лемма 1* позволяет определить условие ограниченности сигналов в модели (14), (15).

**Лемма 2.** Пусть справедливо *Допущение 2*. Тогда, если $\hat{\boldsymbol{\theta}}$ и производные $\dot{\hat{\boldsymbol{\theta}}}$, $\ddot{\hat{\boldsymbol{\theta}}}$, …, $\hat{\boldsymbol{\theta}}^{(n)}$ ограничены, то все сигналы в модели (14), (15) ограничены. □

*Лемма 2* доказывается с помощью аргументов лемм в работах [4, Лемма 5.8] и [9, Лемма 2]. С помощью функции Ляпунова $V(t) = \frac{1}{2}\|\mathbf{z}\|^2$ и ее производной, рассчитанной в силу (14), (11), (12), показывается, что из ограниченности $\hat{\boldsymbol{\theta}}$, $\dot{\hat{\boldsymbol{\theta}}}$, $\ddot{\hat{\boldsymbol{\theta}}}$, …, $\hat{\boldsymbol{\theta}}^{(n)}$ в (14) следует ограниченность $\|\mathbf{z}\|$. Из *Допущения 2* с учетом ограничений (4) следует ограниченность $\varepsilon$, $y$, $\mathbf{x}$ и, как следствие, управлений $\alpha_i$, $u$ и $\lambda_i$ в (7), (8).

[1] Здесь и далее для простоты записи величины, чей индекс выходит за пределы допустимых значений, приняты равными нулю (например, $\lambda_0 = 0$, $\lambda_{n+1} = 0$ и т. п.).

Важным свойством *Лемм 1* и *2* является возможность синтеза алгоритма адаптации на основе модели ошибки (14), (15), способного обеспечить сходимость нормы $\|\mathbf{z}\|$ к нулю.

**Замечание 1.** В общем случае из сходимости $\|\mathbf{z}\|$ не следует сходимость ε к нулю ввиду дополнительного слагаемого $\lambda_1$ в (15). □

**Замечание 2.** В отличие от базового решения [9] в предлагаемой модификации за счет *Допущения 2* ограниченность всех сигналов в замкнутой системе может быть обеспечена и без демпфирования, т. е. при $s_i = 0$ в (7)–(10). Однако заданные в форме (12) демпфирующие члены $s_i$ используются для более простого расчета мажоранты нормы вектора $\|\mathbf{z}\|$, что будет продемонстрировано в дальнейшем. □

### Алгоритм адаптации

С целью синтеза алгоритма адаптации, который позволит ускорить параметрическую настройку регулятора с расчетом старших производных $\dot{\hat{\boldsymbol{\theta}}}$, $\ddot{\hat{\boldsymbol{\theta}}}$, …, $\hat{\boldsymbol{\theta}}^{(n)}$, с помощью леммы о перестановке [4, Приложение F] преобразуем динамическую модель ошибки (14) к статической форме.

**Лемма 3.** Введем в рассмотрение вспомогательные фильтры

$$\dot{\boldsymbol{\xi}} = \mathbf{A}_z\boldsymbol{\xi} + \mathbf{B}_z\hat{\boldsymbol{\theta}}, \quad \boldsymbol{\xi}(0) = -\mathbf{z}(0), \tag{17}$$

$$\dot{\mathbf{W}} = \mathbf{A}_z\mathbf{W} + \mathbf{B}_z, \quad \mathbf{W}(0) = 0, \tag{18}$$

используемые для получения расширенной ошибки

$$\bar{\mathbf{z}} = \mathbf{z} + \boldsymbol{\xi} \tag{19}$$

из динамической модели ошибки (14). Расширенная ошибка $\bar{\mathbf{z}}$ может быть представлена как выход линейной регрессии

$$\bar{\mathbf{z}} = \mathbf{W}\boldsymbol{\theta}. \tag{20}$$ □

*Лемма* доказывается путем расчета производной от невязки $\mathbf{e}_z = \bar{\mathbf{z}} - \mathbf{W}\boldsymbol{\theta} = \mathbf{z} + \boldsymbol{\xi} - \mathbf{W}\boldsymbol{\theta}$ с учетом (17)–(20):

$$\dot{\mathbf{e}}_z = \mathbf{A}_z\mathbf{z} + \mathbf{B}_z\tilde{\boldsymbol{\theta}} + \mathbf{A}_z\boldsymbol{\xi} + \mathbf{B}_z\hat{\boldsymbol{\theta}} - \mathbf{A}_z\mathbf{W}\boldsymbol{\theta} - \mathbf{B}_z\boldsymbol{\theta} =$$

$$= \mathbf{A}_z(\mathbf{z} + \boldsymbol{\xi} - \mathbf{W}\boldsymbol{\theta}) + \mathbf{B}_z(\tilde{\boldsymbol{\theta}} + \hat{\boldsymbol{\theta}} - \boldsymbol{\theta}) = \mathbf{A}_z\mathbf{e}_z,$$

$$\mathbf{e}_z(0) = \mathbf{z}(0) + \boldsymbol{\xi}(0) - \mathbf{W}(0)\boldsymbol{\theta} = 0.$$

Из полученных выражений и структуры матрицы $\mathbf{A}_z$ следует, что $\mathbf{e}_z(t) \equiv 0$. *Лемма 3* доказана.

**Замечание 3.** Благодаря свойствам матрицы $\mathbf{A}_z$, матричный выход фильтра (18) $\mathbf{W}$ ограничен независимо от ограниченности матрицы $\mathbf{B}_z$. Свойство позволяет не использовать нормирующие множители в алгоритмах адаптации, использующих в качестве регрессора матрицу $\mathbf{W}$. □

Линейная регрессия (20) позволяет синтезировать алгоритм адаптации на базе схемы Крейссельмейера [7–9, 15], позволяющий генерировать $\hat{\boldsymbol{\theta}}$, $\dot{\hat{\boldsymbol{\theta}}}$, $\ddot{\hat{\boldsymbol{\theta}}}$, …, $\hat{\boldsymbol{\theta}}^{(n)}$ и регулировать скорость параметрической сходимости. Для этого введем в рассмотрение *устойчивую минимально-фазовую*[1] передаточную функцию вида

$$L(s) = \prod_{i=1}^{n-1}\frac{1}{s + \bar{a}_i} = \frac{1}{a(s)},$$

где $s^{n-1} + a_{n-2}s^{n-2} + a_{n-3}s^{n-3} + \ldots + a_0$ — произвольный гурвицевый полином с вещественными корнями и постоянными коэффициентами, и на основе (20) построим регрессию вида [15, 18]

$$\mathbf{Z} = \boldsymbol{\Omega}\boldsymbol{\theta} \tag{21}$$

с динамически расширенным выходом $\mathbf{Z} = L(s)[\mathbf{W}^T\bar{\mathbf{z}}]$ и матрицей регрессии $\boldsymbol{\Omega} = L(s)[\mathbf{W}^T\mathbf{W}]$.

**Замечание 4.** Из *Замечания 3* и структуры передаточной функции $L(s)$ следует, что матрица $\boldsymbol{\Omega}$ ограничена, симметрична и положительно полуопределена [19]. □

Алгоритм адаптации, сформированный с помощью расширенной регрессии (21), может быть представлен в виде

$$\dot{\hat{\boldsymbol{\theta}}} = \gamma(\mathbf{Z} - \boldsymbol{\Omega}\hat{\boldsymbol{\theta}}) \tag{22.1}$$

или, как показано в работе [19, Замечание 3.2], в форме, позволяющей явно генерировать производные $\dot{\hat{\boldsymbol{\theta}}}$, $\ddot{\hat{\boldsymbol{\theta}}}$, …, $\hat{\boldsymbol{\theta}}^{(n)}$:

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}^{(n)} = \gamma\Bigg(\mathbf{W}^T(\bar{\mathbf{z}} - \mathbf{W}\hat{\boldsymbol{\theta}}) - \sum_{j=0}^{n-2}a_j(\mathbf{Z}^{(j)} - \boldsymbol{\Omega}^{(j)}\hat{\boldsymbol{\theta}}) - \sum_{j=1}^{n-1}C_j^{n-1}\boldsymbol{\Omega}^{(n-j-1)}\hat{\boldsymbol{\theta}}^{(j)}\Bigg), \tag{22.2}$$

где $\gamma > 0$ — коэффициент адаптации, $C_j^k = \dfrac{k!}{k!(k-j)!}$ — биноминальные коэффициенты,

$$\mathbf{Z}^{(j)} = \frac{s^j}{a(s)}[\mathbf{W}^T\bar{\mathbf{z}}], \quad \Omega^{(j)} = \frac{s^j}{a(s)}[\mathbf{W}^T\mathbf{W}].$$

Начальное условие $\hat{\boldsymbol{\theta}}(0)$ принимается произвольным, а начальные условия $\hat{\boldsymbol{\theta}}^{(i)}(0)$ — нулевыми.

Алгоритму адаптации (22) соответствует модель параметрической ошибки

$$\dot{\tilde{\boldsymbol{\theta}}} = -\gamma\boldsymbol{\Omega}\tilde{\boldsymbol{\theta}}, \tag{23}$$

где $\tilde{\boldsymbol{\theta}} = \boldsymbol{\theta} - \hat{\boldsymbol{\theta}}$ — вектор параметрических ошибок.

Сформулируем главный результат настоящей работы.

**Утверждение 1.** Пусть справедливы *Допущение 1* и *2*. Тогда закон управления (9)–(13) совместно с фильтром (7), (8), вспомогательными фильтрами расширения (17), (18), сигналом расширения (19) и алгоритмом адаптации (22), воздействующий на объект (1)–(3), гарантирует следующие свойства в замкнутой системе:
1) все сигналы являются ограниченными;

[1] Передаточная функция представленного вида соответствует *положительным* системам в смысле определения, приведенного в работах [16, 17].

2) вектор $\mathbf{z}(t)$ и ошибка управления ε удовлетворяют неравенствам

$$\|\mathbf{z}(t)\| \le \frac{1}{2\sqrt{c_0 d_0}}\|\tilde{\boldsymbol{\theta}}(0)\| + \|\mathbf{z}(0)\|e^{-c_0 t}, \quad (24)$$

$$|\varepsilon(t)| \le \|\mathbf{z}(t)\| + \frac{\|\beta(\mathbf{x}(t))\Delta u(t)\|_\infty}{c_0}, \quad (25)$$

где $c_0 = \min\limits_{1\le i\le n}\{c_i\}$, $d_0 = \left(\sum\limits_{i=0}^{n}\frac{1}{d_i}\right)^{-1}$;

3) векторы $\mathbf{B}_z(t)\tilde{\boldsymbol{\theta}}(t)$, $\mathbf{z}(t)$ сходятся к нулю при $t \to \infty$;
4) ошибка $\varepsilon(t)$ сходится к нулю при $t \to \infty$ согласно равенству (5);
5) если $\lambda_{\boldsymbol{\Omega}}(t) \notin L_1$, где $\lambda_{\boldsymbol{\Omega}}(t) \ge 0$ — минимальное собственное число $\boldsymbol{\Omega}$, то $\|\tilde{\boldsymbol{\theta}}(t)\|$ сходится к нулю асимптотически. Скорость сходимости $\|\tilde{\boldsymbol{\theta}}(t)\|$ может быть увеличена путем увеличения γ;
6) если $\lambda_{\boldsymbol{\Omega}}(t) \ge \lambda_0$, $\forall t \ge T_0$, где $\lambda_0$, $T_0$ — некоторые положительные константы, то $\|\tilde{\boldsymbol{\theta}}(t)\|$ сходится к нулю экспоненциально. Скорость сходимости $\|\tilde{\boldsymbol{\theta}}(t)\|$ может быть увеличена произвольно путем увеличения γ.

**Замечание 5.** С учетом *Допущения 1*, *Свойства 3* и *5* гарантируют ускорение асимптотической сходимости по ошибке слежения посредством увеличения коэффициента адаптации γ. □

**Доказательство.** Ограниченность $\hat{\boldsymbol{\theta}}$, $\dot{\hat{\boldsymbol{\theta}}}$, следует из (23). Ограниченность $\ddot{\hat{\boldsymbol{\theta}}}$, $\dddot{\hat{\boldsymbol{\theta}}}$, …, $\hat{\boldsymbol{\theta}}^{(n)}$ доказывается путем дифференцирования (22.1) с учетом *Замечания 4* и ограниченности $\hat{\boldsymbol{\theta}}$ и $\dot{\hat{\boldsymbol{\theta}}}$. Таким образом, из результата *Леммы 2* и *Допущения 2* следует справедливость *Свойства 1*.

Для доказательства *Свойств 3*, *5* и *6* введем в рассмотрение функцию Ляпунова $V_{\boldsymbol{\theta}} = \frac{1}{2}\|\tilde{\boldsymbol{\theta}}\|^2$ и рассчитаем ее производную в силу (23):

$$\dot{V}_{\boldsymbol{\theta}} = -\gamma\tilde{\boldsymbol{\theta}}^T\boldsymbol{\Omega}\tilde{\boldsymbol{\theta}} \le -\gamma\lambda_{\Omega}(t)\|\tilde{\boldsymbol{\theta}}\|^2. \quad (26)$$

Интегрируя неравенство (26) с учетом ограниченности $V_{\boldsymbol{\theta}}(0)$ и $V_{\boldsymbol{\theta}}(\infty)$, доказываем, что $\boldsymbol{\Omega}\tilde{\boldsymbol{\theta}}$, $\dot{\hat{\boldsymbol{\theta}}} \in L_2$ и $\boldsymbol{\Omega}(t)\tilde{\boldsymbol{\theta}}(t)$, $\dot{\hat{\boldsymbol{\theta}}}(t) \to 0$ при $t \to \infty$. Как следствие, на основе леммы в [2, Лемма F.4] получаем сходимость $\mathbf{B}_z(t)\tilde{\boldsymbol{\theta}}(t) \to 0$, $\mathbf{z}(t) \to 0$ при $t \to \infty$. *Свойство 3* доказано. Разрешая дифференциальное неравенство (26), получаем

$$\|\tilde{\boldsymbol{\theta}}(t)\| \le \|\tilde{\boldsymbol{\theta}}(0)\|e^{-\gamma\int_0^t \lambda_{\boldsymbol{\Omega}}(\tau)d\tau}, \quad (27)$$

откуда следуют *Свойства 4* и *5*.

Для доказательства *Свойства 2* выберем функцию Ляпунова $V_z = \frac{1}{2}\|\mathbf{z}\|^2$ и рассчитаем ее производную в силу (14) и (12):

$$\dot{V}_z = \frac{1}{2}\mathbf{z}^T(\mathbf{A}_z{}^T + \mathbf{A}_z)\mathbf{z} + \frac{1}{2}\mathbf{z}^T\mathbf{W}\tilde{\boldsymbol{\theta}} + \frac{1}{2}\tilde{\boldsymbol{\theta}}^T\mathbf{W}^T\mathbf{z} =$$

$$= \sum_{i=1}^{n}(-c_i z_i^2 - d_i\|\boldsymbol{\omega}_i\|^2 z_i^2 + z_i\boldsymbol{\omega}_i{}^T\tilde{\boldsymbol{\theta}}) \le$$

$$\le -c_0\|\mathbf{z}\|^2 - \sum_{i=1}^{n}\left(\sqrt{d_i}\|\boldsymbol{\omega}_i\|z_i - \frac{\|\tilde{\boldsymbol{\theta}}\|_\infty}{2\sqrt{d_i}}\right)^2 +$$

$$+ \sum_{i=1}^{n}\frac{\|\tilde{\boldsymbol{\theta}}\|_\infty^2}{4d_i} \le -c_0\|\mathbf{z}\|^2 + \frac{\|\tilde{\boldsymbol{\theta}}\|_\infty^2}{4d_0}.$$

Учитывая, что из (27) следует $\|\tilde{\boldsymbol{\theta}}\|_\infty = \|\tilde{\boldsymbol{\theta}}(0)\|$, перепишем последнее неравенство в форме

$$\frac{d}{dt}(\|\mathbf{z}\|^2) \le -2c_0\|\mathbf{z}\|^2 + \frac{\|\tilde{\boldsymbol{\theta}}\|_\infty^2}{2d_0}.$$

Из решения полученного дифференциального неравенства следует (24).

Из (15) получим

$$\|\varepsilon\| = |z_1 + \lambda_1| \le \|\mathbf{z}\| + \|\boldsymbol{\lambda}\|, \quad (28)$$

где $\boldsymbol{\lambda} = [\lambda_1, \lambda_2, \ldots, \lambda_n]^T$. Введем в рассмотрение функцию $V_\lambda = \frac{1}{2}\|\boldsymbol{\lambda}\|^2$ и вычислим ее производную, учитывая (7), (8) и структуру матрицы $\mathbf{A}_z$:

$$\dot{V}_\lambda = \frac{1}{2}\boldsymbol{\lambda}^T(\mathbf{A}_z{}^T + \mathbf{A}_z)\boldsymbol{\lambda} + \lambda_n\beta(\mathbf{x})\Delta u =$$

$$= -\sum_{i=1}^{n}(c_i + s_i)\lambda_i^2 + \lambda_n\beta(\mathbf{x})\Delta u \le -c_0\|\boldsymbol{\lambda}\|^2 + \|\boldsymbol{\lambda}\|\|\beta(\mathbf{x})\Delta u\|_\infty =$$

$$= -\frac{c_0}{2}\|\boldsymbol{\lambda}\|^2 - \frac{1}{2}\left(\sqrt{c_0}\|\boldsymbol{\lambda}\| - \frac{1}{\sqrt{c_0}}\|\beta(\mathbf{x})\Delta u\|_\infty\right)^2 +$$

$$+ \frac{1}{2c_0}\|\beta(\mathbf{x})\Delta u\|_\infty^2 \le -\frac{c_0}{2}\|\boldsymbol{\lambda}\|^2 + \frac{1}{2c_0}\|\beta(\mathbf{x})\Delta u\|_\infty^2.$$

Из полученного неравенства следует, что

$$\|\boldsymbol{\lambda}(t)\| \le \frac{\|\beta(\mathbf{x})\Delta u(t)\|_\infty}{c_0} + \|\boldsymbol{\lambda}(0)\|e^{-\frac{c_0}{2}t}.$$

Подставляя последнее неравенство в (28), получим (25). *Свойство 2* доказано.

Для доказательства *Свойства 4* сформулируем следующую лемму.

**Лемма 4**. Если выполняется *Свойство 3*, то выполняются целевые равенства

$$\lim_{t\to\infty}(\alpha_i^*(t) - \alpha_i(t)) = 0, \quad \lim_{t\to\infty}(u^*(t) - u(t)) = 0, \quad i = \overline{1, n}, \quad (29)$$

где $u^*(t)$ — идеальный закон управления (см. *Допущение 1*), формируемый путем подстановки в выражения (9), (10) и (13) $\hat{\boldsymbol{\theta}}(t) \equiv \boldsymbol{\theta}$, $\hat{\boldsymbol{\theta}}^{(i)}(t) \equiv 0$. □

*Лемма 4* доказывается с помощью формирования вектора невязки с элементами $\alpha_i^*(t) - \alpha_i(t)$ с учетом *Свойства 3* ($\mathbf{B}_z(t)\tilde{\boldsymbol{\theta}}(t) \to 0$). Следствием леммы является асимптотическое стремление адаптивного закона управления (13) к идеальному неадаптивному $u^*(t)$ из чего, с учетом *Допущения 1* и структуры фильтра (7)–(8), следует справедливость равенств $\lim\limits_{t\to\infty}\Delta u(t) = 0$ и $\lim\limits_{t\to\infty}\lambda_i(t) = 0$.

Принимая во внимание *Свойство 2*, можно утверждать справедливость равенства

$$\lim_{t\to\infty}\varepsilon(t) = \lim_{t\to\infty}z_1(t) - \lim_{t\to\infty}\lambda_1(t) = 0.$$

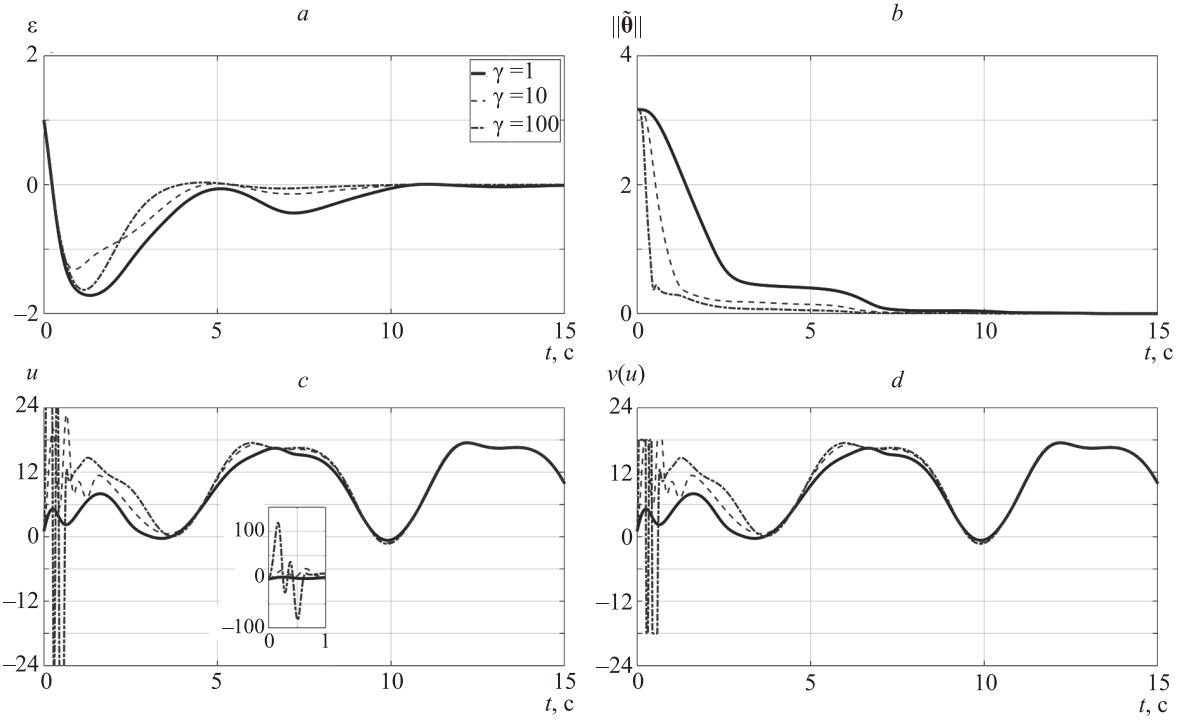



*Рисунок*. Переходные процессы в замкнутой системе: ошибка управления ε (*a*); норма ошибки оценки параметров $\|\tilde{\boldsymbol{\theta}}\|$ (*b*); управление $u$ (*c*); ограниченное управление $v(u)$ (*d*)

*Figure*. Transients in the closed-loop system: control error ε (*a*); parameters estimation error norm $\|\tilde{\boldsymbol{\theta}}\|$ (*b*); control $u$ (*c*); constrained control $v(u)$ (*d*)

*Свойство 4* доказано. ■

Отметим следующие особенности параметрической сходимости в системе: требование $\lambda_{\boldsymbol{\Omega}}(t) \geq \lambda_0$ (*Свойство 5*) эквивалентно условию неисчезающего возбуждения [19, Глава 3; 20], которое необходимо и достаточно для экспоненциальной сходимости оценок $\hat{\boldsymbol{\theta}}(t)$ к $\boldsymbol{\theta}(t)$; *Свойство 4* является более слабым условием чем условие неисчезающего возбуждения в том смысле, что позволяет обеспечить асимптотическую (неэкспоненциальную) сходимость $\hat{\boldsymbol{\theta}}$ даже при невыполнении условия неисчезающего возбуждения.

## Моделирование

Рассмотрим нелинейный объект третьего порядка

$$\dot{x}_1 = x_2 + \mathbf{f}_1^T(x_1)\boldsymbol{\theta},$$
$$\dot{x}_2 = x_3 + \mathbf{f}_2^T(x_1, x_2)\boldsymbol{\theta},$$
$$\dot{x}_3 = \mathbf{f}_3^T(x_1, x_2, x_3)\boldsymbol{\theta} + v(u),$$
$$y = x_1,$$

удовлетворяющий *Допущению 2*, где $\boldsymbol{\theta} = -[3, 1]^T$ — вектор неизвестных параметров $\mathbf{f}_1(x_1) = [\cos(x_1), x_1]^T$, $\mathbf{f}_2(x_1, x_2) = [x_1, x_2]^T$, $\mathbf{f}_3(x_1, x_2, x_3) = [x_1^2 + x_2, x_3]^T$. Порог насыщения для $v(u)$ задан константой $u_M = 18$. Начальное условие состояния объекта задано вектором $\mathbf{x}(0) = [1, 0, 0]^T$. Начальные условия в остальных динамических подсистемах приняты нулевыми.

Адаптивный регулятор синтезирован в соответствии с законом управления (9)–(13) с $c_1 = c_2 = c_3 = 1$, $d_1 = d_2 = d_3 = 10^{-5}$, фильтром (7), (8), вспомогательными фильтрами расширения (17), (18), сигналом расширения (19) и алгоритмом адаптации

$$\dot{\hat{\boldsymbol{\theta}}} = \gamma(\mathbf{W}^T(\bar{\mathbf{z}} - \mathbf{W}\hat{\boldsymbol{\theta}}) - (\mathbf{Z} - \boldsymbol{\Omega}\hat{\boldsymbol{\theta}}) - \boldsymbol{\Omega}\dot{\hat{\boldsymbol{\theta}}}),$$

$$\mathbf{Z} = \frac{1}{s+1}[\mathbf{W}^T\bar{\mathbf{z}}],\ \boldsymbol{\Omega} = \frac{1}{s+1}[\mathbf{W}^T\mathbf{W}].$$

Моделирование выполнено при различных значениях γ с целью сравнительного анализа и демонстрации улучшенной параметрической сходимости. Результаты моделирования приведены на рисунке, где показана асимптотическая сходимость ошибки управления к нулю. Из графиков (рисунок, *a*, *b*) видно, что при увеличении γ скорость настройки параметров регулятора растет и, как следствие, увеличивается скорость стремления $\varepsilon(t)$ к нулю без существенного «всплеска» в начальные моменты времени.

## Заключение

В настоящей работе представлено решение задачи адаптивного управления параметрически неопределенными нелинейными объектами при нарушении условий согласования и наличии ограничений на управляющее воздействие. Решение представляет собой развитие результата, полученного в [9], и позволяет обеспечить возможность ускорения настройки регулятора за счет увеличения коэффициента адаптации γ без существенных «всплесков» ошибки управления в переходных режимах и при наличии ограничений на сигнал управ-

ления. Устранение «всплесков» достигается путем включения и последующего расчета старших производных настраиваемых параметров в закон управления.

В ходе дальнейших исследований планируется ослабить *Допущение 2* за счет доказательства ограниченности неадаптивного закона управления $u^*(t)$, выполнения равенств (29) и, как следствие, ограниченности $\lambda_i(t)$ в (7), (8). Кроме того, теоретический и практический интерес представляет решение поставленной задачи при недоступности прямому измерению вектора состояния объекта.

**Литература**


1. Kanellakopoulos I., Kokotović P.V., Morse A.S. Systematic design of adaptive controllers for feedback linearizable systems // IEEE Transactions on Automatic Control. 1991. V. 36. N 11. P. 1241–1253. https://doi.org/10.23919/ACC.1991.4791451
2. Krstić M., Kanellakopoulos I., Kokotović P.V. Adaptive nonlinear control without overparametrization // Systems & Control Letters. 1992. V. 19. N 3. P. 177–185. https://doi.org/10.1016/0167-6911(92)90111-5
3. Krstic M., Kanellakopoulos I., Kokotovic P.V. Nonlinear and Adaptive Control Design. John Wiley & Sons, Inc., 1995. 563 p.
4. Nikiforov V.O., Voronov K.V. Adaptive backstepping with a high-order tuner // Automatica. 2001. V. 37. N 12. P. 1953–1960. https://doi.org/10.1016/S0005-1098(01)00171-6
5. Morse A.S. High-order parameter tuners for the adaptive control of linear and nonlinear systems // Systems, Models and Feedback: Theory and Applications. 1992. P. 339–364. https://doi.org/10.1007/978-1-4757-2204-8_23
6. Ortega R. On Morse's new adaptive controller: parameter convergence and transient performance // IEEE Transactions on Automatic Control. 1993. V. 38. N 8. P. 1191–1202. https://doi.org/10.1109/9.233152
7. Gerasimov D.N., Pashenko A.V., Nikiforov V.O. Improved adaptive servotracking for a class of nonlinear plants with unmatched uncertainties // IFAC-PapersOnLine. 2020. V. 53. N 2. P. 3835–3840. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2020.12.2074
8. Gerasimov D.N., Pashenko A.V., Nikiforov V.O. Improved adaptive compensation of unmatched multisinusoidal disturbances in uncertain nonlinear plants // Proc. of the American Control Conference (ACC 2020). 2020. P. 626–632. https://doi.org/10.23919/ACC45564.2020.9147356
9. Nikiforov V.O., Gerasimov D., Pashenko A. Modular adaptive backstepping design with a high-order tuner // IEEE Transactions on Automatic Control. 2022. V. 67. N 5. P. 2663–2668 https://doi.org/10.1109/TAC.2021.3091442
10. Kreisselmeier G. Adaptive observers with exponential rate of convergence // IEEE Transactions on Automatic Control. 1977. V. 22. N 1. P. 2–8. https://doi.org/10.1109/TAC.1977.1101401
11. Wen C., Zhou J., Liu Z., Su H. Robust adaptive control of uncertain nonlinear systems in the presence of input saturation and external disturbance // IEEE Transactions on Automatic Control. 2011. V. 56. N 7. P. 1672–1678. https://doi.org/10.1109/TAC.2011.2122730
12. Gao Y.-F., Sun X.-M., Wen C., Wang W. Adaptive tracking control for a class of stochastic uncertain nonlinear systems with input saturation // IEEE Transactions on Automatic Control. 2017. V. 62. N 5. P. 2498–2504. https://doi.org/10.1109/TAC.2016.2600340
13. Min H., Xu S., Ma Q., Zhang B., Zhang Z. Composite-observer-based output-feedback control for nonlinear time-delay systems with input saturation and its application // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2018. V. 65. N 7. P. 5856–5863. https://doi.org/10.1109/TIE.2017.2784347
14. Zhou J., Wen C. Adaptive Backstepping Control of Uncertain Systems: Nonsmooth Nonlinearities, Interactions or Time-Variations. Springer, 2008. 241 p. https://doi.org/10.1007/978-3-540-77807-3
15. Gerasimov D., Nikiforov V. On key properties of the Lion's and Kreisselmeier's adaptation algorithms // International Journal of Adaptive Control and Signal Processing. 2021. in press. https://doi.org/10.1002/acs.3311
16. Kaczorek T. Externally and internally positive time-varying linear systems // Proc. of the 2002 American Control Conference. 2002. V. 6. P. 4638–4641. https://doi.org/10.1109/ACC.2002.1025386
17. Kaczorek T., Sajewski L. The Realization Problem for Positive and Fractional Systems. Springer International Publishing, 2014. 590 p. https://doi.org/10.1007/978-3-319-04834-5


**References**


1. Kanellakopoulos I., Kokotovic P.V., Morse A.S. Systematic design of adaptive controllers for feedback linearizable systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1991, vol. 36, no. 11, pp. 1241–1253. https://doi.org/10.23919/ACC.1991.4791451
2. Krstić M., Kanellakopoulos I., Kokotović P.V. Adaptive nonlinear control without overparametrization. *Systems & Control Letters*, 1992, vol. 19, no. 3, pp. 177–185. https://doi.org/10.1016/0167-6911(92)90111-5
3. Krstic M., Kanellakopoulos I., Kokotovic P.V. *Nonlinear and Adaptive Control Design*. John Wiley & Sons, Inc., 1995, 563 p.
4. Nikiforov V.O., Voronov K.V. Adaptive backstepping with a high-order tuner. *Automatica*, 2001, vol. 37, no. 12, pp. 1953–1960. https://doi.org/10.1016/S0005-1098(01)00171-6
5. Morse A.S. High-order parameter tuners for the adaptive control of linear and nonlinear systems. *Systems, Models and Feedback: Theory and Applications*, 1992, pp. 339–364. https://doi.org/10.1007/978-1-4757-2204-8_23
6. Ortega R. On Morse's new adaptive controller: parameter convergence and transient performance. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1993, vol. 38, no. 8, pp. 1191–1202. https://doi.org/10.1109/9.233152
7. Gerasimov D.N., Pashenko A.V., Nikiforov V.O. Improved adaptive servotracking for a class of nonlinear plants with unmatched uncertainties. *IFAC-PapersOnLine*, 2020, vol. 53, no. 2, pp. 3835–3840. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2020.12.2074
8. Gerasimov D.N., Pashenko A.V., Nikiforov V.O. Improved adaptive compensation of unmatched multisinusoidal disturbances in uncertain nonlinear plants. *Proc. of the American Control Conference (ACC 2020)*, 2020, pp. 626–632. https://doi.org/10.23919/ACC45564.2020.9147356
9. Nikiforov V.O., Gerasimov D., Pashenko A. Modular adaptive backstepping design with a high-order tuner. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2022, vol. 67, no. 5, pp. 2663–2668 https://doi.org/10.1109/TAC.2021.3091442
10. Kreisselmeier G. Adaptive observers with exponential rate of convergence. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1977, vol. 22, no. 1, pp. 2–8. https://doi.org/10.1109/TAC.1977.1101401
11. Wen C., Zhou J., Liu Z., Su H. Robust adaptive control of uncertain nonlinear systems in the presence of input saturation and external disturbance. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2011, vol. 56, no. 7, pp. 1672–1678. https://doi.org/10.1109/TAC.2011.2122730
12. Gao Y.-F., Sun X.-M., Wen C., Wang W. Adaptive tracking control for a class of stochastic uncertain nonlinear systems with input saturation. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2017, vol. 62, no. 5, pp. 2498–2504. https://doi.org/10.1109/TAC.2016.2600340
13. Min H., Xu S., Ma Q., Zhang B., Zhang Z. Composite-observer-based output-feedback control for nonlinear time-delay systems with input saturation and its application. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2018, vol. 65, no. 7, pp. 5856–5863. https://doi.org/10.1109/TIE.2017.2784347
14. Zhou J., Wen C. *Adaptive Backstepping Control of Uncertain Systems: Nonsmooth Nonlinearities, Interactions or Time-Variations.* Springer, 2008, 241 p. https://doi.org/10.1007/978-3-540-77807-3
15. Gerasimov D., Nikiforov V. On key properties of the Lion's and Kreisselmeier's adaptation algorithms. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 2021, in press. https://doi.org/10.1002/acs.3311
16. Kaczorek T. Externally and internally positive time-varying linear systems. *Proc. of the 2002 American Control Conference*, 2002, vol. 6, pp. 4638–4641. https://doi.org/10.1109/ACC.2002.1025386
17. Kaczorek T., Sajewski L. *The Realization Problem for Positive and Fractional Systems*. Springer International Publishing, 2014, 590 p. https://doi.org/10.1007/978-3-319-04834-5

18. Ortega R., Nikiforov V., Gerasimov D. On modified parameter estimators for identification and adaptive control. A unified framework and some new schemes // Annual Reviews in Control. 2020. V. 50. P. 278–293. https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2020.06.002
19. Nikiforov V.O., Gerasimov D.N. Adaptive Regulation: Reference Tracking and Disturbance Rejection. Springer-Verlag, 2022. in press.
20. Ioannou P.A., Sun J. Robust Adaptive Control. V. 1. Upper Saddle River, NJ: PTR Prentice-Hall, 1996. 825 p.

18. Ortega R., Nikiforov V., Gerasimov D. On modified parameter estimators for identification and adaptive control. A unified framework and some new schemes. *Annual Reviews in Control*, 2020, vol. 50, pp. 278–293. https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2020.06.002
19. Nikiforov V.O., Gerasimov D.N. *Adaptive Regulation: Reference Tracking and Disturbance Rejection*. Springer-Verlag, 2022, in press.
20. Ioannou P.A., Sun J. *Robust Adaptive Control*. V. 1. Upper Saddle River, NJ, PTR Prentice-Hall, 1996, 825 p.

## Авторы

**Пашенко Артем Витальевич** — инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, SC 57215657771, https://orcid.org/0000-0002-9461-8180, ar.vi.pashenko@gmail.com
**Герасимов Дмитрий Николаевич** — кандидат технических наук, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, SC 36637147000, https://orcid.org/0000-0001-8306-4138, dngerasimov@itmo.ru
**Парамонов Алексей Владимирович** — кандидат технических наук, ассистент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, SC 57188966696, https://orcid.org/0000-0002-6355-0670, avparamonov@itmo.ru
**Никифоров Владимир Олегович** — доктор технических наук, профессор, проректор по научной работе, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, SC 7103218872, https://orcid.org/0000-0003-4860-5407, nikiforov_vo@itmo.ru

## Authors

**Artem V. Pashenko** — Engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, SC 57215657771, https://orcid.org/0000-0002-9461-8180, ar.vi.pashenko@gmail.com
**Dmitry N. Gerasimov** — PhD, Associate Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, SC 36637147000, https://orcid.org/0000-0001-8306-4138, dngerasimov@itmo.ru

**Aleksei V. Paramonov** — PhD, Assistant, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, SC 57188966696, https://orcid.org/0000-0002-6355-0670, avparamonov@itmo.ru

**Vladimir O. Nikiforov** — D. Sc., Professor, Vice-Rector for Research, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, SC 7103218872, https://orcid.org/0000-0003-4860-5407, nikiforov_vo@itmo.ru

*Статья поступила в редакцию 25.02.2022*
*Одобрена после рецензирования 19.03.2022*
*Принята к печати 15.05.2022*

*Received 25.02.2022*
*Approved after reviewing 19.03.2022*
*Accepted 15.05.2022*

Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ
май–июнь 2022 Том 22 № 3 http://ntv.ifmo.ru/
SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL OF INFORMATION TECHNOLOGIES, MECHANICS AND OPTICS
May–June 2022 Vol. 22 No 3 http://ntv.ifmo.ru/en/
ISSN 2226-1494 (print) ISSN 2500-0373 (online)
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК УНИВЕРСИТЕТ ИТМО
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ

doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-3-480-491

# Application of failure detection methods to detect information attacks on the control system

**Alexey A. Margun[1], Radda A. Iureva[2], Daria V. Kolesnikova[3]✉**

[1,2,3] ITMO University, Saint Peterburg, 197101, Russian Federation
[1] Institute for Problems in Mechanical Engineering of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, 199178, Russian Federation

[1] alexeimargun@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-5333-0594
[2] raddaiureva@itmo.ru, https://orcid.org/0000-0002-8006-0980
[3] Kolesnikova_d@itmo.ru✉, https://orcid.org/0000-0003-0942-3926

**Abstract**
The problem of ensuring the security of control systems is an important and urgent problem. It consists of eliminating the impact of failures and attacks on control objects and the environment, etc. Prevention of critical failures is important. The purpose of this study is to analyze the similarities between the consequences of attacks on complex technical systems and failures of these systems. In the course of the work, a hypothesis about the similarity of the impact of failures and information attacks on a complex technical system is presented. Both information attacks and failures cause anomalous dynamics of the control object. Analysis of the deviation of the dynamics of the control object from the normal mode of operation will allow us to detect and isolate information attacks and failures. The paper examines the influence of information attacks on the dynamics of automatic control systems. Comparison of abnormal dynamics of control objects during attacks and device failures is carried out. The similarity of the consequences of information attacks and failures of the control system are analyzed, a method for identifying attacks based on the methods developed for detecting failures is developed. Computer modeling of the influence of information attacks and failures on the control system of a DC motor has been carried out. The simulation results allow making a conclusion about the applicability of the failure detection algorithms for detecting attacks. It is shown that failures and information attacks can lead to dangerous consequences for the control system. It seems relevant to study the intersection of the field of information security and failure detection.

**Keywords**
failure detection, failure isolation, reliability, dangerous failure, functional safety, fault tolerance, attack

**For citation:** Margun A.A., Iureva R.A., Kolesnikova D.V. Application of failure detection methods to detect information attacks on the control system. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2022, vol. 22, no. 3, pp. 480–491. doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-3-480-491

УДК 004.052

# Применение методов детектирования отказов для обнаружения информационных атак на систему управления

**Алексей Анатольевич Маргун[1], Радда Алексеевна Юрьева[2], Дарья Викторовна Колесникова[3]✉**

[1,2,3] Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация
[1] Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург, 199178, Российская Федерация

[1] alexeimargun@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-5333-0594
[2] raddaiureva@itmo.ru, https://orcid.org/0000-0002-8006-0980
[3] Kolesnikova_d@itmo.ru✉, https://orcid.org/0000-0003-0942-3926

**Аннотация**
Обеспечение безопасности систем управления – важная и актуальная проблема. Она состоит в исключении влияния отказов и атак на объекты управления, окружающую среду и др. Большое значение имеет предотвращение

© Margun A.A., Iureva R.A., Kolesnikova D.V., 2022

критических отказов. Выполнен анализ сходств последствий атак на сложные технические системы и отказов этих систем. Рассмотрено влияние информационных атак на динамику систем автоматического управления. В ходе работы представлена гипотеза о сходстве влияния отказов и информационных атак на сложную техническую систему. Как информационные атаки, так и отказы вызывают отклонения динамики объекта управления. Анализ отклонения динамики объекта управления от нормального режима функционирования позволит детектировать и изолировать информационные атаки и отказы. Проведено сравнение аномальной динамики объектов управления при атаках и отказах устройств, обнаружены зависимости, и сделаны выводы. Проанализировано сходство последствий информационных атак и отказов системы управления, разработана методика идентификации атак на основе методов, разработанных для детектирования отказов. Выполнено компьютерное моделирование влияния информационных атак и отказов на систему управления двигателем постоянного тока, приведены результаты в виде графиков. Результаты моделирования позволяют сделать вывод о применимости алгоритмов детектирования отказов для обнаружения атак. Показано, что отказы и информационные атаки могут привести к опасным последствиям для системы управления. Актуальным представляется исследование пересечения области информационной безопасности и детектирования отказов.

**Ключевые слова**
детектирование отказов, изоляция отказов, надежность, опасный отказ, функциональная безопасность, отказоустойчивость, кибератака

**Ссылка для цитирования:** Маргун А.А., Юрьева Р.А., Колесникова Д.В. Применение методов детектирования отказов для обнаружения информационных атак на систему управления // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2022. Т. 22, № 3. С. 480–491 (на англ. яз.). doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-3-480-491

## Introduction

Information systems protection is becoming urgent and requires increased attention in connection with the development and use of global computing systems and networks, information complexes, and remote-control systems.

However, the pace of research in fault-tolerant functioning and cyber-physical systems security significantly lags far behind the field of development of information technologies. Today, the functioning of technical systems leads to an increase in the volume of processed information which reduces their work reliability. As a result, to ensure systems fault-tolerant functioning, there are not enough tools and methods. Consequently, the risk of various vulnerabilities and information threats, faults, and attacks increases.

Technical systems should improve the following properties: adaptability, fault tolerance, security, and simplicity of use.

Prime examples of modern technical systems are the Internet of Things, multi-agent digital production systems, unmanned vehicles, and intelligent robotic systems. The structure and function logic of such systems are significantly different from classical information systems. Therefore, the existing methodologies for ensuring security and fault-tolerant functioning for complex systems are not sufficiently effective.

The relevance of solving the problem of ensuring the secure and fault-tolerant functioning of technical systems is caused by the importance of improving their correct operation, especially in critical infrastructure. Thus, victims may be commercial organizations that have received financial damage with a successful attack or fault and the population and the environment of the entire state. In this regard, it is necessary to consider both cybersecurity and the quality of all pro-cases.

This paper aims to analyze the combination of techniques for ensuring information and operational security of technical systems.

Even at the early development of technical systems, researchers noted a similarity in the description of security technologies evolution and control theory systems evolution. The focus of both approaches is on keeping the system within a certain set of states. In this regard, managing the security of complex systems capable of changing their state and self-regulation has gained great importance.

The problem of ensuring the safety of the functioning of control systems is to exclude the influence of failures and attacks on control objects and the environment, i.e., in the elimination of critical failures. This study aims to analyze the similarities between the consequences of attacks on complex technical systems and failures of these systems.

## Information and functional security

### Attack and fault concept

Information security is a set of protecting information means from accidental or intentional impact. Regardless of what is the basis of the impact: natural factors or artificial reasons, information owner incurs losses.

The key areas for assessing the damage and impact of threats and attacks on information security are:

— Enterprise operation (can slow down processes and operations work, it is typical not only for commercial, but also for government organizations).
— Decrease in profits and other funds (company part in the market, revenue, and margin).
— Deterioration in product quality or developed service.
— Negative impact on the company's image (change in the market position, among sponsors), impact on the company's goal, business project.

A fault is an event that means complete or partial disruption of the object, element, or system performance.

Faults are classified and characterized by different types and parameters. For example, it can be categorized by type: parametric or functional. In the first case, object parameters change within unacceptable limits. In the second case, there is complete or partial functions termination.

Also, fault can be distinguished by nature: random and systemic. Accidental faults occur in unforeseen situations (defects, failures, personnel errors, breakdowns in the control system). Systemic failures occur in the cases of natural and unavoidable facts, for example, with erroneous commands or secondary failures.

Reliability is the property of an object to continuously perform specified functions for the required time in given modes and operating conditions.

Fault tolerance is the system's ability to maintain its properties and perform specified functions even in the event of individual components fault or faults at system modules levels.

It should be noted that the behavior of the system may be similar during an attack or fault. This allows concluding that the methods used to detect, identify, isolate, and adaptively compensate negative effects can be combined to solve a complex problem in a destructive environment. The developed algorithms and approaches can provide the accurate determination of destructive impact type and investigate the high level of system security, reduce the number of vulnerabilities, and maintain the quality of technical systems functioning throughout the operation phase.

Maintaining stable functioning and ensuring information security comes to the fore during the attack for dynamic protection. The solution of this problem may consider technical systems ability to change their structure to counter destructive impacts.

The scientific problem relevance depends on the growing need for modern methods of technical system intelligent control which can ensure the implementation of the high demands placed on them in the work process. Such requirements are related to security, reliability, and fault tolerance in case of destructive impact.

From a safety standpoint, both in the event of a destructive information impact and in case of failure of a system component, its operation should be stopped while maintaining stability, or the performance should be reduced to the prescribed limits if a dangerous failure is inadmissible. To do this, it is necessary to timely detect and isolate information attacks and failures. By isolation we mean the definition of the type of failure and its localization. Hence, there exists the need to create technologies for reliable isolation of information attacks and failures in complex technical systems. In the theory of automatic control, several approaches have been developed that provide detection and isolation of failures based on available measurements and description of the dynamics of control objects. However, no such conceptual schemes, applicable to a wide range of systems, have been proposed for identifying information attacks. In this study, a hypothesis is put forward about the similarity of the influence of failures and attacks on the components of a technical system which in the future will make it possible to develop approaches for detecting and isolating attacks based on the theory of reliability and the scientific and methodological apparatus of the theory of automatic control.

The main triad of information security (IS) is availability, integrity, and confidentiality of the data of the technical system. The property of functional security (FS) is to ensure the correct execution of system functions, and in the event of failures, to transfer the control object to a safe state. The analysis of the properties of IS and FS in the complex (Fig. 1) has become relevant in connection with the development of cyber-physical systems that interact with objects of the real world using global networks and cloud services. These systems can be vulnerable both in the real (physical) world and at the information level, and these levels are inextricably linked in their architecture.

Thus, it is required in modern technical systems to ensure reliability in relation to both information attacks and failures. The solution of this problem can be developing

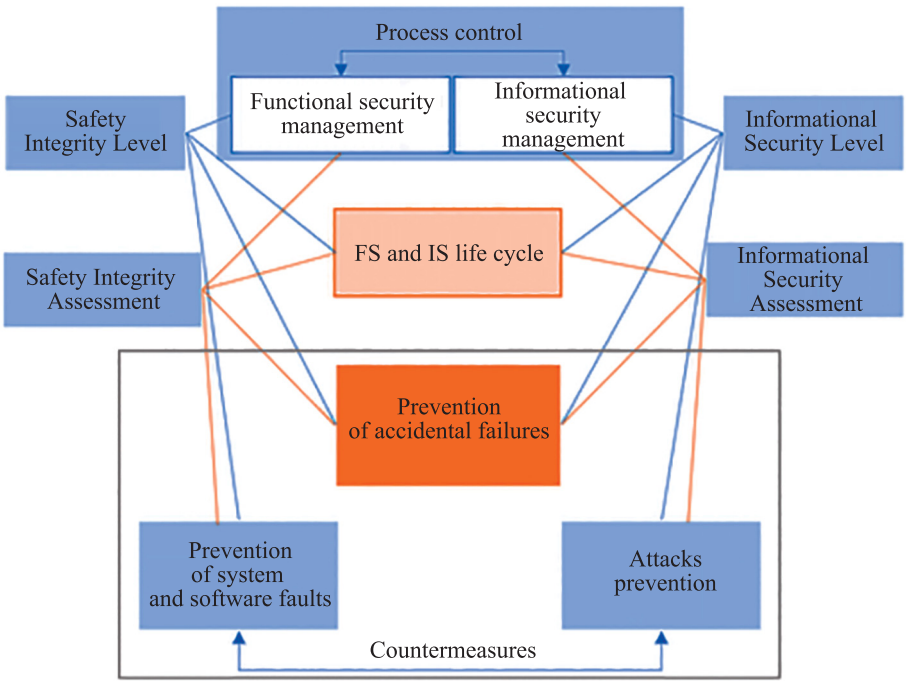



*Fig. 1*. The structure of requirements for functional and information security of technical systems

a methodology for the simultaneous detection of attacks and failures and their isolation. It is required to determine which failure or attack occurs in the system in order to take the most effective measures to compensate for the negative effects.

## Literature review

This section provides an overview of the works that are related to the detection of failures and attacks on control systems (Table 1).

Since both failures and information attacks can lead to dangerous consequences for the control system, it is relevant to study the intersection of the information security area and failure detection. The research is based on the hypothesis about the similarity of failures and information attacks on a complex technical system. Both information attacks and failures cause anomalous dynamics of the control object. Analysis of the deviation of the control object dynamics from the normal mode of operation makes it possible to detect and isolate information attacks and failures.

*Table 1.* Comparison of attacks from the point of view of theory of automated control and IS

| Reference | Review |
|---|---|
| [1, 2] | The emergence of complex systems class was facilitated by the need of processes qualitative reorganization in many areas, implying the intellectual automation of complex operations using robotic systems. Increased attention to technical systems is associated with the concept of Industry 4.0 representing the fourth industrial revolution which involves the deep integration of advanced information technologies in physical processes.<br>Modern technical systems and technological facilities are equipped with increasingly sophisticated control tools that enable them to maintain normal operation and increase process efficiency while meeting safety requirements. Complexity of synthesizing algorithms for coordinated interaction of components increases with higher complexity of systems. Thus, malfunctions and vulnerabilities that can lead to faults, attacks, casualties, and accidents increases. There are special algorithms based on model adaptive approaches, fault-tolerance control methods; and software and/or hardware redundancy to solve system control problems. These solutions are highly specialized for individual systems, are not scalable and do not allow integration at different levels of management (low — operational, medium — tactical, high — strategic). |
| [3] | The ability to provide desired performance of technical systems both in the absence and in the presence of faults is an important task in many control systems. One of the techniques for monitoring system performance is Fault detection, isolation, and re-configuration (FDIR).<br>In the paper various FDIR methods are considered classified based on reliable fault detection methods, statistical decision-making methods, and reconfiguration management methods. |
| [4, 5]<br>[6–8]<br>[9–11]<br>[12]<br>[13–15]<br>[16]<br>[17]<br>[18, 19]<br>[20, 21]<br>[22, 23] | Technical systems in practice are distorted due to the presence of noise, unknown disturbances, and uncertainties in the system model. Consequently, many methods for determining faults are aimed to create stable residual that can be insensitive to noise and uncertainties, but sensitive to faults and attacks. Such methods can be grouped into several basic approaches:<br>1) full-state observer-based methods;<br>2) unknown input observers;<br>3) parity relations approach;<br>4) optimization-based approach;<br>5) Kalman filter-based approach;<br>6) stochastic approach;<br>7) system identification approach;<br>8) nonlinear systems approach;<br>9) discrete event systems/hybrid systems approach;<br>10) artificial intelligence techniques. |
| [24] | In the article, detailed review of existing methods for troubleshooting and fault-tolerant operation is presented. |
| [25–28] | The principles of fault-tolerance control can be based on a re-configuration of the system, adaptive methods of fail-safe control of nonlinear systems and active methods of fail-safe control. |
| [29] | The first studies on attacks identification in technical systems date back to the early 2000s. The article provides an overview of the current state of the industry. |
| [30] | The attacks have complex and multi-level schemes, they are multi-step and extended over time, and can also consider individual characteristics of the technical system. Most defense systems oriented on physical- and cybersecurity operate independently of each other. |
| [31] | Existing information security methodologies do not consider specifics of technical systems and are not able to ensure the functioning of such systems under conditions of destructive influences. |
| [32, 33] | Attacks can affect system physical state, they can be scalable, easily automated and replicated. Attacks affect:<br>confidentiality (maintaining the security of users' data in systems);<br>integrity (modification of data or resources without permission);<br>availability (failures in computer technology, equipment, management, etc.);<br>reliability (user authentication in the system). |

*Table 1.* Continuation

| Reference | Review |
|---|---|
| [34, 35] | Basically, when attacking complex technical systems, attackers use the so-called APT attacks (complex targeted attacks, advanced persistent threat attack) consisting of several stages and include attacks of a lower level of complexity. In general, such attacks can be divided into levels and these levels can be classified according to the method presented in the given articles:<br>Social engineering to obtain confidential information or distribute malicious software, and one of the main goals is to reduce the level of trust in the system and "damage" the reputation. Phishing attacks are used to gain access to information channels.<br>Hacking, as one of the first steps to attack the system. When using hacking, an attacker looks for vulnerabilities in software and hardware, uses errors in protection mechanisms or other shortcomings of the system under attack (attacks through third-party channels).<br>Interception of data circulating in the system (Man-in-the-Middle, injection).<br>Selection of credentials to obtain passwords and access to all resources of the victim.<br>Exploitation of web vulnerabilities, theft of information from web resources.<br>DDoS attacks that can lead to the execution of arbitrary code, unauthorized control of industrial equipment and failure of its operation. At the same time, most vulnerabilities can be exploited remotely without authentication, and their exploitation does not require special knowledge and a high level of skills from the attacker.<br>Use of malicious software to collect data from computers inside the system. It is this method that is used in most complex targeted attacks for integration into the target system.<br>In general, from the point of view of technical systems, the most dangerous attacks are Advanced Persistent Threats (APT) attacks, Man-in-the-Middle attacks, channel attacks, and injection. |
| [36] | Article provides assessment of the possible impact on electric network and its ability to withstand potential faults after attack. It emphasizes the importance of cyberinfrastructure security combined with applications security to mitigate and prevent cyberattacks. A multi-level approach to risk assessment is introduced. |
| [37] | Review explores heterogeneous data streams from autonomous technical systems. Aspects of security and confidentiality in the management of big data for such systems are considered as well as the latest problems in the data field confidentiality are considered. |
| [38, 39] | The successful implementation of attacks on complex systems is closely integrated with various industries. It can lead not only to financial damages but also to human casualties because of technological and environmental disasters. At the same time, the number of attacks on industrial facilities is steadily growing. These reasons and criticality of systems operation disruption demonstrates the relevance of the research. |
| [40] | There are several approaches for fault detection: parity relationships, observer based and identification methods.<br>Parity relationship approaches are based on hardware or temporal redundancy. Hardware redundancy solutions require duplication of sensors and actuators. This leads to additional technological and financial costs. The approach based on time redundancy proposes to analyze not the current mismatch of the sensor data with the expected ones, but with the mismatches at the preceding current moment certain time interval. |
| [41] | Observer-based approaches propose to analyze the residual signal. The residual signal is a mismatch between sensor data and it estimates the plant state variables obtained by observers. The problem of fault isolation is solved based on structured residual sets, directional residual vectors and special residual signal generators or filters that sensitive only for special residual signals corresponding to respective faults. Observer-based methods are effective for sensor and actuator faults detection. |
| [42] | Identification-based approaches are used for component fault detection and isolation where a component fault is a deviation of physical parameters from their nominal value. |
| [43] | Authors propose two fail-safe methods for calculating reconciliation sensors for installations with increased sensitivity, as well as two methodologies for designing a failure detection system. The first is based on a formulation with a linear parameter change, and the second is based on the linear fractional transformation paradigm. |
| [44] | Various approaches are used to detect information attacks – an overview of control systems attacks presents four types of attacks (response and measurement injection, command injection and denial of service) and analyzes the consequences of these attacks on the nodes of the control system. |
| [45] | The paper presents an analysis of vulnerabilities and detection of attacks which was carried out on programmable logic controllers (PLCs), as one of the most important components, on the test bench, and a set of rules was created to detect active start/stop attacks. The analysis used a mirroring method to prevent the detection system from placing additional stress on the existing system and adversely affecting system performance. |
| [46] | Authors have proposed an algorithm for detecting and preventing DDoS attacks based on network changes and it is used to overcome the problem of DDoS attacks and protect routing tasks. Through various transactions, a fault can be identified in each sensor node. The DDoS attack identifier is decoupled from network failures based on the error value. |
| [47] | In this work, a mathematical basis for monitoring attacks on cyber-physical systems is proposed, and a description of the fundamental limitations of monitoring from a system-theoretical point of view and a graph theory point of view. |
| [48] | In the paper the authors proposed methods and measures to counter cybersecurity threats in various approaches to the system design. |

**Classification of attacks and failures**

By cybersecurity, we mean ensuring information and functional security of a cyber-physical system's functioning — a technical system that includes a physical component and a virtual one (algorithms, calculations, channel data transmission medium). The main threats to cybersecurity breaches in complex technical systems are (Fig. 2):

— information attacks;
— failures in the operation of system nodes, including hardware and software failures and errors.

Considering various classification signs of failures and attacks according to their influence on the dynamics of the control system from the nature point of view of changes in the parameters that determine the technical state of the object, it is possible to distinguish abrupt or gradual deviations. An abrupt change in parameters can be caused by a critical defect that changes the system's structure (for example, a breakdown of a mechanical part or a failure of a power source) or an information attack (for example, an attacker substitutes the values measured by sensors). A gradual change in parameters is typical for equipment deterioration and change in its parameters due to operating conditions. An example would be the change in resistance of a heating element due to thermal expansion, which affects heating. Similar features can be used to isolate failures and attacks.

From the point of view of the interrelation of destructive processes, they can be independent (only one element of the system works incorrectly, which does not disable others) and dependent (the failure of one element entails several others' failure and the system as a whole). From the functional safety point of view, the latter case is the most critical.

The reasons for equipment failures can be classified as structural, production, and operational (Table 2). According to this classification, compliance with the attribute will not be essential for the dynamics of the system which reduces its value for the task set in the study.

An idle state can persist for a long time, be short-term, or occur periodically under similar conditions. The first case is typical for both attacks and failures. If after taking measures to prevent the attack, the inoperable state persists, then its reason is the failure, and vice versa. The second case is more typical for information attacks, the third — for technical failures caused by a certain mode of operation of the control object.

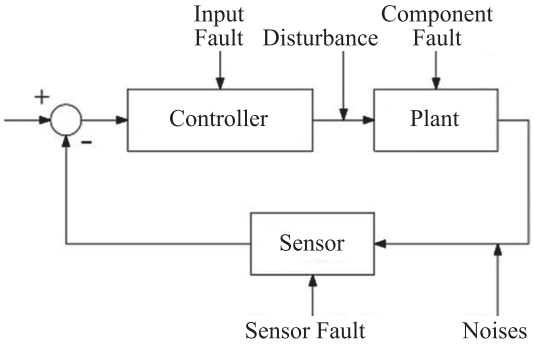



*Fig. 2*. Typical structure of an automatic control system and possible destructive factors

For the reliable functioning of control systems, it is necessary to ensure continuous monitoring of its state, a method for detecting failures and attacks, and also a set of measures to compensate and prevent their influence. This approach will provide a guaranteed level of cyber security in case of hardware and software failures and destructive influences by integrating the scientific and methodological apparatus for identifying and isolating failures for similar tasks when attacking complex technical systems.

**Analysis of the impact of attacks and failures on the dynamics of control systems**

Let us analyze the impact of information attacks on the dynamics of control systems and represent how the anomalous dynamics is interpreted from the fault detection and isolation algorithms perspective (Table 3). Consider an attacker acting on a controller, plant, and sensors as a source of information attacks.

An attacker can remotely penetrate a controller (a device that calculates control signals and implements control laws). In this case, he can restart the controller or stop its work. During the restart, the controller values are reset (for example, the outputs of the control law's integrators are reset to zero), and the controller will be stopped for a while (initialization). When the controller is stopped, the control signal becomes a constant (including zero). From the theory of automatic control point of view, plant dynamics looks like an input disturbance inverse to the control signal. These destructive effects can be identified by actuator fault detection and isolation methods. The following signs can also detect this type of attack: there are no controller output signals (signal is equal to zero or last value of controller), the control signal becomes constant when the sensors data changes.

In the local controller penetration, the attacker intercepts control, i.e., the control signal becomes independent from the sensor data. An approach similar to the described above can be used to detect this type of attack. Possible signs of controller local penetration include a jump-like change of the control signal; the controller output does not correspond to the value calculated on the base of the input data and signals from the sensors; the dynamics of the plant does not correspond to the controller input signal (tracking or stabilization error).

In the case of a local sensor penetration, an attacker alters its measurements. From the automatic control point of view, it is a noise in the measurement channel. However, the amplitude of the noise can reach the limits of the sensor measurement range. Algorithms of sensor faults detection and isolation can be used to detect this type of attack. The following signs correspond to this attack: a rapid increase of the noise amplitude; an abrupt change of the sensor signal; the signal measured by the sensor does not correspond to the predicted value calculated based on the control signal and the plant model.

The controller stops its operation when a remote denial of service attack is implemented. The same features characterize this attack as remote penetration of the controller.

*Table 2.* Classification feature and its meaning

| Classification feature | Values (nature of change) of the classification feature | Type of failure | Reasons |
|---|---|---|---|
| The nature of the change in the parameters that determine the technical state of the object | Abrupt change in one or more parameters | Sudden | Internal defects, operator errors, operational disturbances, local penetration |
| | Gradual change in one or more parameters | Gradual | Aging of materials, corrosion, wear of parts, etc. |
| Interrelation of failures | The failure of an element is not caused by damage or failure of other elements of this object | Independent | — |
| | Element failure due to damage or failure of other elements | Dependent | Damage and failures of other elements of an object or system |
| Origin of failure | Violation of established rules and (or) design standards, imperfection of accepted design methods | Structural | Errors in the development and design of an object, underestimation of safety margins, violation of GOST standards, etc. |
| | Violation of the established process of manufacturing or repairing an object, imperfection of manufacturing technology | Manufacturing | Failure to comply with documentation standards, use of low-quality materials and components, insufficient level of production quality control, etc. |
| | Violation of the established rules and (or) operating conditions | Operational | Errors of low-qualified service personnel, ignoring / violation of the rules of technical documentation as well as aging and wear of equipment for the above reasons |
| Stability of an inoperative state | Stable persistent | Stable | Change of object parameters, irreversible damage to system elements |
| | It remains for a short time, after which the operability is self-healing or restored by the operator without repairs | Self-eliminating (sporadic failure) | Short-term external influences, short-term change in object parameters |
| | It has the same character, arises and removes itself many times | Intermittent | External interference and impacts that go beyond the permissible technical limits and are reversible |

*Table 3.* Comparison of attacks from the point of view of theory of automated control and IS

| Attack | Object | Action | According to fault |
|---|---|---|---|
| Remote penetration | Controller | Remote restart or shutdown | Input disturbance equal to inverse of input signal |
| Local penetration | Controller | Control Intercept | Input disturbance with amplitude up to input signal range |
| | Sensor | Data modification | Output noises with amplitude up to sensor measurement range |
| Remote denial of service | Controller | Full stop | Input disturbance equal to inverse of input signal |
| | Sensor | Full stop | Output noises with amplitude up to sensor measurement range |
| Jamming and data spoofing on sensor | Sensor | Jamming or data spoofing | Output noises with amplitude up to sensor measurement range |
| Decommissioning of component | Component | Destructive effect, manifested in the unstable functioning of the component | Dramatic deviation between measured and predicted dynamics of the plant |

In remote denial of service, signals from the sensor are stopped (nothing, zero, or the last sent value comes as a measurement signal). The same approaches and features for local sensor penetration can be applied to detect this type of attack.

During sensor jamming or data substitution, the sensor signal does not correspond to measured physical values. The following signs can accompany this attack: a sharp increase of the noise amplitude; an abrupt change of the sensor signal; the measured output of the plant does not

correspond to the predicted one based on the model of the plant. Sensor fault detection and isolation algorithms are effective for the detection of this attack.

In the case of an attack that entails the failure of one of the plant components, its dynamics becomes unpredictable. This attack can be determined by the method of elimination: if all previous faults and attacks are excluded, and the component's dynamics do not correspond to the nominal, then the dynamic model is incorrect. Therefore, one of the components has failed. Also, it is possible to build a set of models with faults. The attack detection can be based on the similarity of the system's behavior and faulty system dynamics.

### Modeling attacks on a control system

Consider DC motor. Its dynamics is described by equations:

$$L\frac{dI}{dt} + RI = U - E_b,$$
$$L\frac{dI}{dt} + RI = U - E_b,$$
$$J\dot{\omega} = M - M_{fr},$$

where ω is an angular velocity; $I$ is a current; $L$ is an armature inductance; $R$ is an armature resistance; $U$ is an input voltage; $E_b = k_e\omega$ is a back-EMF; $k_e$ is a constant; $J = J_d + J_m$ inertia momentum; $J_d$ is a rotor inertia momentum; $J_m$ is a load inertia momentum; $M = k_m I$ is a motor force momentum; $k_m$ is a constant; $M_{fr} = k_f\omega$ is a friction momentum; and $k_f$ is a friction coefficient.

Rewrite model under faults in state space representation:

$$\dot{x} = Ax + Bu + f_a,$$
$$y = Cx + f_s,$$

where $x^T = [\omega \quad i]$ is a state vector.

$$A = \begin{bmatrix} -k_f/J & k_m/J \\ -k_e/L & -R/L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a1 & a2 \\ a3 & a4 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1/L \end{bmatrix},$$

$f_a$ is an impact of attack on the controller, $f_s$ is an impact of attack on the sensor.

Assume that motor equipped with a velocity sensor. Therefore:

$$C = [1 \quad 0].$$

**Attack on the executive device**

Controller that calculates the supply voltage with an integrated or connected driver is an actuator for a DC motor. Fig. 3 shows the signal of the DC motor angular velocity sensor during attacks on the controller, where ω is a sensor data without attack; $\omega_{local}$ is a sensor signal under controller local penetration; and $\omega_{remote}$ is a sensor signal under controller remote penetration. Local penetration simulates the case when attacker intercepted control of the motor and applied excess voltage from 5 to 10 seconds. The controller was disconnected from 5 to 10 seconds under remote penetration.

The dynamics of the output in the considered cases is identical to the dynamics in the case of actuator fault. Therefore, abnormal behavior during attacks on the controller can be detected using the state observers-based methods of fault detection. Attack isolation can be implemented using methods of actuator fault isolation, for example, [41].

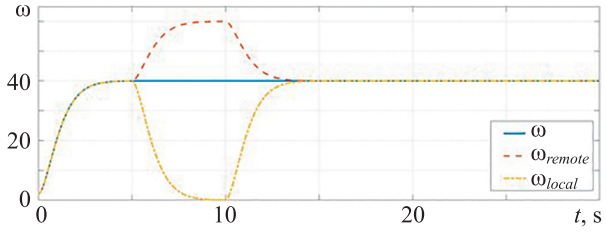



*Fig. 3*. Readings of the DC motor speed sensor during attacks on the controller

**Attack on the sensor**

Consider the effect of sensor attacks on motor velocity transients. Fig. 4 shows examples of the angular velocity sensor signal during attacks on it. Graph ω illustrates transients without attacks.

Graph $\omega_{stuck}$ illustrates jammed sensor data from 1.6 to 1.5 seconds. A sensor jamming can be caused by local penetration or a remote denial of service. Case of sensor data replacement on $\omega_{replace}$ is presented in Fig. 4.

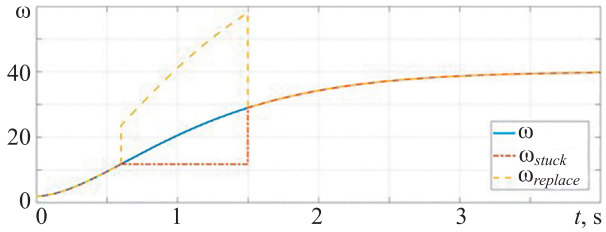



*Fig. 4*. Readings of the angular velocity sensor when attacking it

Simulation results show that sensor signals during information attacks are similar to signals during failures. Thus, we can conclude that the sensor signals are similar in the cases of faults and attacks. Therefore, such methods of sensor fault detection and isolation, as based on observers and generators of residuals, hardware and time redundancy, can be used to detect attacks on the sensor.

**Component failure/component attack**

An attack on one of an automatic control system component can lead to parametric and structural disturbances. Fig. 5 graphs of velocity sensor under normal functioning (ω) and under sufficient deviation of motor parameters ($\omega_{fault}$) are presented below.

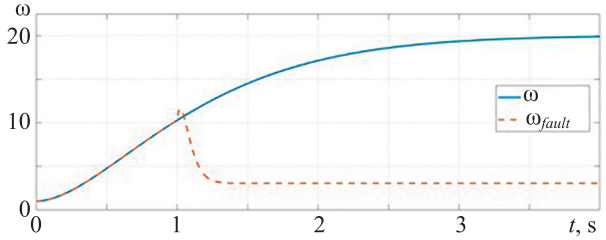



*Fig. 5*. Attack on a component

The similarity of the behavior of the system under component fault and under attack acting on plant parameters is due to the same physical impact on the plant. Therefore, it is advisable to use such methods based on the identification of the parameters of the plant for attack detection and isolation [42] as gradient approach, the least squares and dynamic regressor extension and mixing [49]. It is difficult to directly determine which element resulting in changes of the plant structure has been attacked since the behavior of the system becomes unpredictable. In this case, it is advisable to build faulty plant models under such attacks with further analysis of dynamics similarity.

## Conclusion

In technical systems, detection of one malfunction does not guarantee the preservation of system integrity since attacks and faults can mutually reinforce each other and do more harm to the technical system, up to its destruction. Faults and attacks can function at different system levels, creating and reinforcing vulnerabilities that open the way to any destructive impact.

The field of research is a new area of scientific development which naturally appeared with the development of automatic control theory, mechanics, electronics, and digital and information technologies.

Research in detection and protection from faults has been conducted for a long time, but no approach allows analyzing attacks and faults together using uniform algorithms and approaches.

Recent research results focus on either information security analysis or robust and adaptive control. The intersection of information security and automatic control theory approaches will allow synthesizing algorithms and approaches that can significantly increase both information and functional security of technical systems.

Moreover, such an interdisciplinary approach can contribute to a positive economic effect by reducing repair time, increasing system quality indicators, etc.

In the course of the work, it was noted the patent purity of the study. Thus, it can be concluded that today it is extremely important to solve the problem of generally-purpose methods synthesis of multilevel control of systems with scalability and fault tolerance.

Also, in the paper the impact of information attacks and failures on automatic control systems is analyzed, the reasons and behavioral portraits of various types of attacks on technical systems and failures of actuators, sensors, and components are considered. The analysis revealed that the detection and isolation of failures can be used to detect and isolate a wide class of attacks on controllers, measuring devices and control system components. Computer modeling using a DC motor as an example revealed that the dynamics of control systems subjected to information attacks is similar to the dynamics of control systems with failures. This conclusion can be extended to a wide class of technical systems. Based on the results obtained, in the future, a structure for ensuring information and functional security can be developed (Fig. 1), based on the scientific and methodological apparatus for detecting and isolating failures of technical systems, which will increase the level of reliability, timely identify failures and information attacks within one control system, take timely measures to compensate their impact, reduce the time to restore the correct operation of the system.

## References


1. Lee J., Bagheri B., Kao H.A. A cyber-physical systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*, 2015, vol. 3, pp. 18–23. https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2014.12.001
2. Lasi H., Fettke P., Kemper H.G., Feld T., Hoffmann M. Industry 4.0. *Business & Information Systems Engineering*, 2014, vol. 6, no. 4, pp. 239–242. https://doi.org/10.1007/s12599-014-0334-4
3. Hwang I., Kim S., Kim Y., Seah C.E. A survey of fault detection, isolation, and reconfiguration methods. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2010, vol. 18, no. 3, pp. 636–653. https://doi.org/10.1109/TCST.2009.2026285
4. Patton R.J., Chen J. On eigenstructure assignment for robust fault diagnosis. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2000, vol. 10, no. 14, pp. 1193–1208. https://doi.org/10.1002/1099-1239(20001215)10:14<1193::AID-RNC523>3.0.CO;2-R
5. Wünnenberg J., Frank P.M. Sensor fault detection via robust observers. *System Fault Diagnostics, Reliability and Related Knowledge-Based Approaches. V. 1*. Springer, Dordrecht, 1987, pp. 147–160. https://doi.org/10.1007/978-94-009-3929-5_5
6. Watanabe K., Himmelblau D.M. Instrument fault detection in systems with uncertainties. *International Journal of Systems Science*, 1982, vol. 13, no. 2, pp. 137–158. https://doi.org/10.1080/00207728208926337
7. Frank P.M., Wünnenberg J. Robust fault diagnosis using unknown input observers schemes. *Fault Diagnosis in Dynamic Systems: Theory and Application*. New York, Prentice-Hall, 1989, pp. 47–98.
8. Gertler J. Fault detection and isolation using parity relations. *Control Engineering Practice*, 1997, vol. 5, no. 5, pp. 653–661. https://doi.org/10.1016/S0967-0661(97)00047-6
9. Patton R.J., Chen J. Robust fault detection using eigenstructure assignment: A tutorial consideration and some new results. *Proc. of*


## Литература


1. Lee J., Bagheri B., Kao H.A. A cyber-physical systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems // Manufacturing Letters. 2015. V. 3. P. 18–23. https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2014.12.001
2. Lasi H., Fettke P., Kemper H.G., Feld T., Hoffmann M. Industry 4.0 // Business & Information Systems Engineering. 2014. V. 6. N 4. P. 239–242. https://doi.org/10.1007/s12599-014-0334-4
3. Hwang I., Kim S., Kim Y., Seah C.E. A survey of fault detection, isolation, and reconfiguration methods // IEEE Transactions on Control Systems Technology. 2010. V. 18. N 3. P. 636–653. https://doi.org/10.1109/TCST.2009.2026285
4. Patton R.J., Chen J. On eigenstructure assignment for robust fault diagnosis // International Journal of Robust and Nonlinear Control. 2000. V. 10. N 14. P. 1193–1208. https://doi.org/10.1002/1099-1239(20001215)10:14<1193::AID-RNC523>3.0.CO;2-R
5. Wünnenberg J., Frank P.M. Sensor fault detection via robust observers // System Fault Diagnostics, Reliability and Related Knowledge-Based Approaches. V. 1. Springer, Dordrecht, 1987. P. 147–160. https://doi.org/10.1007/978-94-009-3929-5_5
6. Watanabe K., Himmelblau D.M. Instrument fault detection in systems with uncertainties // International Journal of Systems Science. 1982. V. 13. N 2. P. 137–158. https://doi.org/10.1080/00207728208926337
7. Frank P.M., Wünnenberg J. Robust fault diagnosis using unknown input observers schemes // Fault Diagnosis in Dynamic Systems: Theory and Application. New York: Prentice-Hall, 1989. P. 47–98.
8. Gertler J. Fault detection and isolation using parity relations // Control Engineering Practice. 1997. V. 5. N 5. P. 653–661. https://doi.org/10.1016/S0967-0661(97)00047-6
9. Patton R.J., Chen J. Robust fault detection using eigenstructure assignment: A tutorial consideration and some new results // Proc. of

*the 30th IEEE Conference on Decision and Control*, 1991, pp. 2242–2247. https://doi.org/10.1109/CDC.1991.261546
10. Patton R.J., Chen J. Review of parity space approaches to fault diagnosis for aerospace systems. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 1994, vol. 17, no. 2, pp. 278–285. https://doi.org/10.2514/3.21194
11. Stoustrup J., Niemann H.H. Fault estimation — a standard problem approach. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2002, vol. 12, no. 8, pp. 649–673. https://doi.org/10.1002/rnc.716
12. Maqill D.T. Optimal adaptive estimation of sampled stochastic processes. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1965, vol. 10, no. 4, pp. 434–439. https://doi.org/10.1109/TAC.1965.1098191
13. Maybeck P.S. *Stochastic Models, Estimation and Control. V. 1*. Arlington, VA, Navtech Press, 1994, 423 p.
14. Maybeck P.S. *Stochastic Models, Estimation and Control. V. 2*. Arlington, VA, Navtech Press, 1994.
15. Wang H., Lin W. Applying observer based FDI techniques to detect faults in dynamic and bounded stochastic distributions. *International Journal of Control*, 2000, vol. 73, no. 15, pp. 1424–1436. https://doi.org/10.1080/002071700445433
16. Simani S., Fantuzzi C., Patton R.J. *Model-Based Fault Diagnosis in Dynamic Systems Using Identification Techniques*. London, U.K., Springer, 2003, XV, 282 p. https://doi.org/10.1007/978-1-4471-3829-7
17. Chen R.H., Ng H.K., Speyer J.L., Guntur L.S., Carpenter R. Health monitoring of a satellite system. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2006, vol. 29, no. 3, pp. 593–605. https://doi.org/10.2514/1.15012
18. Pertew M., Marquez H.J., Zhao Q. Design of unknown input observers for Lipschitz nonlinear systems. *Proceedings of the American Control Conference*, 2005, vol. 6, pp. 4198–4203. https://doi.org/10.1109/ACC.2005.1470637
19. Baroni P., Lamperti G., Pogliano P., Zanella M. Diagnosis of a class of distributed discrete-event systems. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics Part A: Systems and Humans*, 2000, vol. 30, no. 6, pp. 731–752. https://doi.org/10.1109/3468.895897
20. Lunze J., Schröder J. Sensor and actuator fault diagnosis of systems with discrete inputs and outputs. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, 2004, vol. 34, no. 2, pp. 1096–1107. https://doi.org/10.1109/TSMCB.2003.820593
21. Cordier M.O., Dugue P., Dumas M., Lévy F., Montmain J., Staroswiecki M., Travé Massuyès L. AI and automatic control approaches of model-based diagnosis: Links and underlying hypotheses. *IFAC Proceedings Volumes*, 2000, vol. 33, no. 11, pp. 279–284. https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)37373-1
22. Cordier M.O., Dague P., Lévy F., Mountmain J., Staroswiecki M., Travé-Massuyès L. Conflicts versus analytical redundancy relations: A comparative analysis of the model based diagnosis approach from the artificial intelligence and automatic control perspectives. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, 2004, vol. 34, no. 5, pp. 2163–2177. https://doi.org/10.1109/TSMCB.2004.835010
23. Blanke M., Kinnaert M., Lunze J., Staroswiecki M. *Diagnosis and Fault-Tolerant Control*. Berlin, Springer, 2006, XIX, 672 p. https://doi.org/10.1007/978-3-540-35653-0
24. Zhang Y., Jiang J. Bibliographical review on reconfigurable fault-tolerant control systems. *Annual Reviews in Control*, 2008, vol. 32, no. 2, pp. 229–252. https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2008.03.008
25. Zhang X., Parisini T., Polycarpou M.M. Adaptive fault-tolerant control of nonlinear uncertain systems: an information-based diagnostic approach. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2004, vol. 49, no. 8, pp. 1259–1274. https://doi.org/10.1109/TAC.2004.832201
26. Iureva R.A., Margun A.A., Maltseva N.K., Vedernikov K. Electromechanical drive fault detection. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 643, no. 1, pp. 012114. https://doi.org/10.1088/1757-899X/643/1/012114
27. Zhang Y.M., Jiang J. Active fault-tolerant control system against partial actuator failures. *IEE Proceedings: Control Theory and Applications*, 2002, vol. 149, no. 1, pp. 95–104. https://doi.org/10.1049/ip-cta:20020110
28. Khurana H., Hadley M., Lu N., Frincke D.A. Smart-grid security issues. *IEEE Security and Privacy*, 2010, vol. 8, no. 1, pp. 81–85. https://doi.org/10.1109/MSP.2010.49
29. Desnitsky V.A., Levshun D.S., Chechulin A.A., Kotenko I.V. Design technique for secure embedded devices: Application for creation of integrated cyber-physical security system. *Journal of Wireless Mobile*

the 30th IEEE Conference on Decision and Control. 1991. P. 2242–2247. https://doi.org/10.1109/CDC.1991.261546
10. Patton R.J., Chen J. Review of parity space approaches to fault diagnosis for aerospace systems // Journal of Guidance, Control, and Dynamics. 1994. V. 17. N 2. P. 278–285. https://doi.org/10.2514/3.21194
11. Stoustrup J., Niemann H.H. Fault estimation — a standard problem approach // International Journal of Robust and Nonlinear Control. 2002. V. 12. N 8. P. 649–673. https://doi.org/10.1002/rnc.716
12. Maqill D.T. Optimal adaptive estimation of sampled stochastic processes // IEEE Transactions on Automatic Control. 1965. V. 10. N 4. P. 434–439. https://doi.org/10.1109/TAC.1965.1098191
13. Maybeck P.S. Stochastic Models, Estimation and Control. V. 1. Arlington, VA: Navtech Press, 1994.
14. Maybeck P.S. Stochastic Models, Estimation and Control. V. 2. Arlington, VA: Navtech Press, 1994.
15. Wang H., Lin W. Applying observer based FDI techniques to detect faults in dynamic and bounded stochastic distributions // International Journal of Control. 2000. V. 73. N 15. P. 1424–1436. https://doi.org/10.1080/002071700445433
16. Simani S., Fantuzzi C., Patton R.J. Model-Based Fault Diagnosis in Dynamic Systems Using Identification Techniques. London, U.K.: Springer, 2003. XV, 282 p. https://doi.org/10.1007/978-1-4471-3829-7
17. Chen R.H., Ng H.K., Speyer J.L., Guntur L.S., Carpenter R. Health monitoring of a satellite system // Journal of Guidance, Control, and Dynamics. 2006. V. 29. N 3. P. 593–605. https://doi.org/10.2514/1.15012
18. Pertew M., Marquez H.J., Zhao Q. Design of unknown input observers for Lipschitz nonlinear systems // Proceedings of the American Control Conference. 2005. V. 6. P. 4198–4203. https://doi.org/10.1109/ACC.2005.1470637
19. Baroni P., Lamperti G., Pogliano P., Zanella M. Diagnosis of a class of distributed discrete-event systems // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics Part A: Systems and Humans. 2000. V. 30. N 6. P. 731–752. https://doi.org/10.1109/3468.895897
20. Lunze J., Schröder J. Sensor and actuator fault diagnosis of systems with discrete inputs and outputs // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics. 2004. V. 34. N 2. P. 1096–1107. https://doi.org/10.1109/TSMCB.2003.820593
21. Cordier M.O., Dugue P., Dumas M., Lévy F., Montmain J., Staroswiecki M., Travé Massuyès L. AI and automatic control approaches of model-based diagnosis: Links and underlying hypotheses // IFAC Proceedings Volumes. 2000. V. 33. N 11. P. 279–284. https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)37373-1
22. Cordier M.O., Dague P., Lévy F., Mountmain J., Staroswiecki M., Travé-Massuyès L. Conflicts versus analytical redundancy relations: A comparative analysis of the model based diagnosis approach from the artificial intelligence and automatic control perspectives // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics. 2004. V. 34. N 5. P. 2163–2177. https://doi.org/10.1109/TSMCB.2004.835010
23. Blanke M., Kinnaert M., Lunze J., Staroswiecki M. Diagnosis and Fault-Tolerant Control. Berlin: Springer, 2006. XIX, 672 p. https://doi.org/10.1007/978-3-540-35653-0
24. Zhang Y., Jiang J. Bibliographical review on reconfigurable fault-tolerant control systems // Annual Reviews in Control. 2008. V. 32. N 2. P. 229–252. https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2008.03.008
25. Zhang X., Parisini T., Polycarpou M.M. Adaptive fault-tolerant control of nonlinear uncertain systems: an information-based diagnostic approach // IEEE Transactions on Automatic Control. 2004. V. 49. N 8. P. 1259–1274. https://doi.org/10.1109/TAC.2004.832201
26. Iureva R.A., Margun A.A., Maltseva N.K., Vedernikov K. Electromechanical drive fault detection // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. V. 643. N 1. P. 012114. https://doi.org/10.1088/1757-899X/643/1/012114
27. Zhang Y.M., Jiang J. Active fault-tolerant control system against partial actuator failures // IEE Proceedings: Control Theory and Applications. 2002. V. 149. N 1. P. 95–104. https://doi.org/10.1049/ip-cta:20020110
28. Khurana H., Hadley M., Lu N., Frincke D.A. Smart-grid security issues // IEEE Security and Privacy. 2010. V. 8. N 1. P. 81–85. https://doi.org/10.1109/MSP.2010.49
29. Desnitsky V.A., Levshun D.S., Chechulin A.A., Kotenko I.V. Design technique for secure embedded devices: Application for creation of integrated cyber-physical security system // Journal of Wireless

*Networks, Ubiquitous Computing, and Dependable Applications*, 2016, vol. 7, no. 2, pp. 60–80. https://doi.org/10.22667/JOWUA.2016.06.31.060
30. Alguliyev R., Imamverdiyev Y., Sukhostat L. Cyber-physical systems and their security issues. *Computers in Industry*, 2018, vol. 100, pp. 212–223. https://doi.org/10.1016/j.compind.2018.04.017
31. Wang E.K., Ye Y., Xu X., Yiu S.M., Hui L.C.K., Chow K.P. Security issues and challenges for cyber physical system. *Proc. of the IEEE/ACM International Conference on Green Computing and Communications (GreenCom), 2010 IEEE/ACM International Conference on Cyber, Physical and Social Computing, (CPSCom)*, 2010, pp. 733–738. https://doi.org/10.1109/GreenCom-CPSCom.2010.36
32. Sicari S., Rizzardi A., Grieco L.A., Coen-Porisini A. Security, privacy and trust in Internet of Things: the road ahead. *Computer Networks*, 2015, vol. 76, pp. 146–164. https://doi.org/10.1016/j.comnet.2014.11.008
33. Sridhar S., Hahn A., Govindarasu M. Cyber-physical system security for the electric power grid. *Proceedings of the IEEE*, 2012, vol. 100, no. 1, pp. 210–224. https://doi.org/10.1109/JPROC.2011.2165269
34. Gifty R., Bharathi R., Krishnakumar P. Privacy and security of big data in cyber physical systems using Weibull distribution-based intrusion detection. *Neural Computing and Applications*, 2019, vol. 31, no. 1, pp. 23–34. https://doi.org/10.1007/s00521-018-3635-6
35. Iureva R.A., Kremlev A.S., Margun A.A., Vlasov S.M., Timko A.S. Measures to design secure cyber-physical things. *Smart Innovation, Systems and Technologies*, 2019, vol. 142, pp. 315–322. https://doi.org/10.1007/978-981-13-8311-3_27
36. Iureva R.A., Danenkov I.S., Timko A.S., Vlasov S.M., Vasilkov S.D. Optical sensors in IoT. *Proceedings of SPIE*, 2019, vol. 11028, pp. 1102816. https://doi.org/10.1117/12.2517076
37. Iureva R.A., Belov A.A., Margun A.A., Kremlev A.S. Electric drive attack detection based on state observers. *Proc. of the 20th International Carpathian Control Conference (ICCC)*, 2019, pp. 8766015. https://doi.org/10.1109/carpathiancc.2019.8766015
38. Iureva R., Margun A., Maltseva N., Vedernikov K. Electromechanical drive fault detection. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 643, no. 1, pp. 012114. https://doi.org/10.1088/1757-899X/643/1/012114
39. Dobriborsci D., Margun A., Kolyubin S. Theoretical and experimental research of the discrete output robust controller for uncertain plant. *Proc. of the 16th European Control Conference (ECC)*, 2018, pp. 533–538. https://doi.org/10.23919/ECC.2018.8550138
40. Chen J., Patton R.J. *Robust Model-Based Fault Diagnosis for Dynamic Systems*. Boston, MA, U.S.A., Kluwer Academic Publishers, 1999, pp. 354.
41. Patton R.J., Chen J. Observer-based fault detection and isolation: Robustness and applications. *Control Engineering Practice*, 1997, vol. 5, no. 5, pp. 671–682. https://doi.org/10.1016/S0967-0661(97)00049-X
42. Isermann R. Supervision, fault-detection and fault-diagnosis methods — An introduction. *Control Engineering Practice*, 1997, vol. 5, no. 5, pp. 639–652. https://doi.org/10.1016/S0967-0661(97)00046-4
43. Behzad H., Casavola A., Tedesco F., Sadrnia M.A. Fault-tolerant sensor reconciliation schemes based on unknown input observers. *International Journal of Control*, 2020, vol. 93, no. 3, pp. 669–679. https://doi.org/10.1080/00207179.2018.1484568
44. Morris T., Gao W. Industrial control system cyber attacks. *Proc. of the 1st International Symposium for ICS & SCADA Cyber Security Research*, 2013, pp. 22–29. https://doi.org/10.14236/ewic/icscsr2013.3
45. Yılmaza E.N., Gönenb S. Attack detection/prevention system against cyber-attack in industrial control systems. *Computers and Security*, 2018, vol. 77, pp. 94–105. https://doi.org/10.1016/j.cose.2018.04.004
46. Rathika R.K., Marimuthu A. An improved detection and prevention of DDoS attacks in nuclear power plants machine monitoring. *Proc. of the Second International Conference on Electrical, Computer and Communication Technologies (ICECCT)*, 2017, pp. 1–7. https://doi.org/10.1109/ICECCT.2017.8117897
47. Pasqualetti F., Dorfler F., Bullo F. Attack detection and identification in cyber-physical systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2013, vol. 58, no. 11, pp. 2715–2729. https://doi.org/10.1109/TAC.2013.2266831
48. Danenkov I., Kolesnikova D., Babikov A., Iureva R. Security by design development methodology for file hosting case. *Smart*

Mobile Networks, Ubiquitous Computing, and Dependable Applications. 2016. V. 7. N 2. P. 60–80. https://doi.org/10.22667/JOWUA.2016.06.31.060
30. Alguliyev R., Imamverdiyev Y., Sukhostat L. Cyber-physical systems and their security issues // Computers in Industry. 2018. V. 100. P. 212–223. https://doi.org/10.1016/j.compind.2018.04.017
31. Wang E.K., Ye Y., Xu X., Yiu S.M., Hui L.C.K., Chow K.P. Security issues and challenges for cyber physical system // Proc. of the IEEE/ACM International Conference on Green Computing and Communications (GreenCom), 2010 IEEE/ACM International Conference on Cyber, Physical and Social Computing, (CPSCom). 2010. P. 733–738. https://doi.org/10.1109/GreenCom-CPSCom.2010.36
32. Sicari S., Rizzardi A., Grieco L.A., Coen-Porisini A. Security, privacy and trust in Internet of Things: the road ahead // Computer Networks. 2015. V. 76. P. 146–164. https://doi.org/10.1016/j.comnet.2014.11.008
33. Sridhar S., Hahn A., Govindarasu M. Cyber-physical system security for the electric power grid // Proceedings of the IEEE. 2012. V. 100. N 1. P. 210–224. https://doi.org/10.1109/JPROC.2011.2165269
34. Gifty R., Bharathi R., Krishnakumar P. Privacy and security of big data in cyber physical systems using Weibull distribution-based intrusion detection // Neural Computing and Applications. 2019. V. 31. N 1. P. 23–34. https://doi.org/10.1007/s00521-018-3635-6
35. Iureva R.A., Kremlev A.S., Margun A.A., Vlasov S.M., Timko A.S. Measures to design secure cyber-physical things // Smart Innovation, Systems and Technologies. 2019. V. 142. P. 315–322. https://doi.org/10.1007/978-981-13-8311-3_27
36. Iureva R.A., Danenkov I.S., Timko A.S., Vlasov S.M., Vasilkov S.D. Optical sensors in IoT // Proceedings of SPIE. 2019. V. 11028. P. 1102816. https://doi.org/10.1117/12.2517076
37. Iureva R.A., Belov A.A., Margun A.A., Kremlev A.S. Electric drive attack detection based on state observers // Proc. of the 20th International Carpathian Control Conference (ICCC). 2019. P. 8766015. https://doi.org/10.1109/carpathiancc.2019.8766015
38. Iureva R., Margun A., Maltseva N., Vedernikov K. Electromechanical drive fault detection // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. V. 643. N 1. P. 012114. https://doi.org/10.1088/1757-899X/643/1/012114
39. Dobriborsci D., Margun A., Kolyubin S. Theoretical and experimental research of the discrete output robust controller for uncertain plant // Proc. of the 16th European Control Conference (ECC). 2018. P. 533–538. https://doi.org/10.23919/ECC.2018.8550138
40. Chen J., Patton R.J. Robust Model-Based Fault Diagnosis for Dynamic Systems. Boston, MA, U.S.A.: Kluwer Academic Publishers, 1999. P. 354.
41. Patton R.J., Chen J. Observer-based fault detection and isolation: Robustness and applications // Control Engineering Practice. 1997. V. 5. N 5. P. 671–682. https://doi.org/10.1016/S0967-0661(97)00049-X
42. Isermann R. Supervision, fault-detection and fault-diagnosis methods — An introduction // Control Engineering Practice. 1997. V. 5. N 5. P. 639–652. https://doi.org/10.1016/S0967-0661(97)00046-4
43. Behzad H., Casavola A., Tedesco F., Sadrnia M.A. Fault-tolerant sensor reconciliation schemes based on unknown input observers // International Journal of Control. 2020. V. 93. N 3. P. 669–679. https://doi.org/10.1080/00207179.2018.1484568
44. Morris T., Gao W. Industrial control system cyber attacks // Proc. of the 1st International Symposium for ICS & SCADA Cyber Security Research. 2013. P. 22–29. https://doi.org/10.14236/ewic/icscsr2013.3
45. Yılmaza E.N., Gönenb S. Attack detection/prevention system against cyber-attack in industrial control systems // Computers and Security. 2018. V. 77. P. 94–105. https://doi.org/10.1016/j.cose.2018.04.004
46. Rathika R.K., Marimuthu A. An improved detection and prevention of DDoS attacks in nuclear power plants machine monitoring // Proc. of the Second International Conference on Electrical, Computer and Communication Technologies (ICECCT). 2017. P. 1–7. https://doi.org/10.1109/ICECCT.2017.8117897
47. Pasqualetti F., Dorfler F., Bullo F. Attack detection and identification in cyber-physical systems // IEEE Transactions on Automatic Control. 2013. V. 58. N 11. P. 2715–2729. https://doi.org/10.1109/TAC.2013.2266831
48. Danenkov I., Kolesnikova D., Babikov A., Iureva R. Security by design development methodology for file hosting case // Smart Innovation, Systems and Technologies. 2020. V. 188. P. 383–390. https://doi.org/10.1007/978-981-15-5584-8_33

*Innovation, Systems and Technologies*, 2020, vol. 188, pp. 383–390. https://doi.org/10.1007/978-981-15-5584-8_33
49. Belov A.A., Aranovskiy S., Ortega R., Barabanov N., Bobtsov A.A. Enhanced parameter convergence for linear systems identification: The DREM approach. *Proc. of the 16th European Control Conference (ECC)*, 2018, pp. 2794–2799. https://doi.org/10.23919/ECC.2018.8550338

49. Belov A.A., Aranovskiy S., Ortega R., Barabanov N., Bobtsov A.A. Enhanced parameter convergence for linear systems identification: The DREM approach // Proc. of the 16th European Control Conference (ECC). 2018. P. 2794–2799. https://doi.org/10.23919/ECC.2018.8550338

## Authors

**Alexey A. Margun** — PhD, Assistant Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation; Researcher, Institute for Problems in Mechanical Engineering of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, 199178, Russian Federation, SC 55521791600, https://orcid.org/0000-0002-5333-0594, alexeimargun@gmail.com

**Radda A. Iureva** — PhD, Associate Professor, Associate Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, SC 57190606805, https://orcid.org/0000-0002-8006-0980, raddaiureva@itmo.ru

**Daria V. Kolesnikova** — PhD Student, Assistant, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, SC 57206781641, https://orcid.org/0000-0003-0942-3926, Kolesnikova_d@itmo.ru

## Авторы

**Маргун Алексей Анатольевич** — кандидат технических наук, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация; научный сотрудник, Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург, 199178, Российская Федерация, SC 55521791600, https://orcid.org/0000-0002-5333-0594, alexeimargun@gmail.com

**Юрьева Радда Алексеевна** — кандидат технических наук, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, SC 57190606805, https://orcid.org/0000-0002-8006-0980, raddaiureva@itmo.ru

**Колесникова Дарья Викторовна** — аспирант, ассистент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, SC 57206781641, https://orcid.org/0000-0003-0942-3926, Kolesnikova_d@itmo.ru

*Received 14.02.2022*
*Approved after reviewing 14.04.2022*
*Accepted 15.05.2022*

*Статья поступила в редакцию 14.02.2022*
*Одобрена после рецензирования 14.04.2022*
*Принята к печати 15.05.2022*

Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ
май–июнь 2022 Том 22 № 3 http://ntv.ifmo.ru/
SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL OF INFORMATION TECHNOLOGIES, MECHANICS AND OPTICS
May–June 2022 Vol. 22 No 3 http://ntv.ifmo.ru/en/
ISSN 2226-1494 (print) ISSN 2500-0373 (online)

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК УНИВЕРСИТЕТ ИТМО
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ

doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-3-492-500
УДК 681.5.09

# Алгоритм детектирования и локализации отказов двигателя постоянного тока

**Никита Сергеевич Колесник[1]✉, Алексей Анатольевич Маргун[1,2]**

[1,2] Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург, 199178, Российская Федерация
[2] Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

[1] nik.kolesnik.1998@mail.ru✉, https://orcid.org/0000-0002-8630-4202
[2] alexeimargun@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-5333-0594

**Аннотация**

**Предмет исследования.** Исследован современный подход к решению проблемы детектирования отказов двигателей постоянного тока. Предложен алгоритм онлайн-оценки работоспособности двигателя постоянного тока при различных нагрузках. **Метод.** Метод детектирования основан на использовании набора наблюдателей Люенбергера полного порядка. Схема локализации построена с применением направленных генераторов рассогласования и оценки соотношений между вектором ошибки наблюдения и векторами рассогласования для различных видов отказов. **Основные результаты.** Разработана процедура синтеза алгоритма детектирования и локализации отказов двигателей постоянного тока. Выполнено компьютерное моделирование на примере двигателя постоянного тока RK 370CA при условиях: отказа из-за неучтенного момента силы, действующего на ротор; отклонения входного напряжения от заданного; сбоев датчиков скорости и тока. В результате эксперимента выявлено корректное определение состояния двигателя (наличие отказа) и причины отказа. Проведено сравнение предложенного подхода с решениями, основанными на аппаратной и временной избыточностях, подходах идентификации и синтеза наблюдателей. Определено преимущество подхода — возможность детектирования и локализации отказов как по входным, так и по выходным сигналам при тривиальной процедуре синтеза и отсутствии необходимости расширения аппаратной части системы. Представленный метод применим для линейных систем второго порядка, а также может быть развит для объектов старшего порядка при необходимом изменении систем уравнений, решаемых при построении наблюдателей. **Практическая значимость.** Предложенный метод позволяет производить онлайн-локализацию отказов и не требует дополнительных средств измерения, что способствует сокращению расходов на диагностику, экономии времени ремонта и обслуживания, своевременному обнаружению аварий. Результаты работы могут найти применение в разработке систем управлении двигателями постоянного тока для повышения надежности и отказоустойчивости.

**Ключевые слова**

детектирование отказов, локализация отказов, двигатель постоянного тока, направленный генератор рассогласований

**Благодарности**

Исследование частично проведено при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, госзадание № 2019-0898. Работа частично выполнена в ИПМаш РАН при поддержке госзадания № 121112500298-6 (ЕГИСУ НИОКТР).

**Ссылка для цитирования:** Колесник Н.С., Маргун А.А. Алгоритм детектирования и локализации отказов двигателя постоянного тока // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2022. Т. 22, № 3. С. 492–500. doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-3-492-500

© Колесник Н.С., Маргун А.А., 2022

# DC motor fault detection and isolation scheme with the use of directional residual set

**Nikita S. Kolesnik[1]✉, Alexey A. Margun[1,2]**

[1] IPMash RAS, Saint Petersburg, 199178, Russian Federation
[2] ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

[1] nik.kolesnik.1998@mail.ru✉, https://orcid.org/0000-0002-8630-4202
[2] alexeimargun@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-5333-0594

**Abstract**
The subject of research is presented as online-estimation of characteristics of DC motors under various loads. The paper is devoted to a modern approach to solve the problem of detecting DC motor failures. Proposed detection method is based on the set of full state Luenberger observers. Isolation scheme uses directional residual set and relationships between fault direction and residual vector. The procedure of synthesizing the fault detection and isolation algorithm for DC motor is designed. This scheme performance is proved with computer modeling of typical DC motor RK 370CA with faults caused by unaccounted force momentum acting on rotor, input voltage disturbance, velocity and current sensors failures. The algorithm correctly defines motor state (fault presence or absence) and also properly isolates fault cause. Proposed method advantage is compared to other solutions based on hardware and timing redundancy, identification and observers lies in the opportunity to detect and isolate faults of input and output signals with trivial synthesis and absence of the need to expand system hardware. Proposed method is applicable to any second order system, and also there is a possibility to use it for higher order systems with the corresponding changing of the equation systems solving for observer synthesis. This algorithm allows realizing online fault isolation and does not require additional measuring which promotes decrease of diagnostic costs, repair and serving time saving, modern accident detection. The results can be applied to DC motor control to increase reliability and to develop DC motor control systems.

**Keywords**
failure detection, failure isolation, DC motor, directional residual generator

**Acknowledgements**
Research has been partially made with support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, government order № 2019-0898; this work has been partially completed in IPME RAS with support of government order № 121112500298-6 (USAIS RDTCW).

**For citation:** Kolesnik N.S., Margun A.A. DC motor fault detection and isolation scheme with the use of directional residual set. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2022, vol. 22, no. 3, pp. 492–500 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-3-492-500

## Введение

Развитие современных технологий привело к автоматизации процессов в различных областях человеческой деятельности: машиностроении, химической промышленности, энергетике, пищевой промышленности и др. Такие системы, как правило, имеют сложную структуру, которая включает взаимосвязанные датчики, актуаторы (источники управляющих сигналов, например, для вала электродвигателя актуатором является драйвер, который служит источником напряжения) и пассивные элементы. Многие из элементов подвержены износу и выходу из строя под влиянием внешних факторов. Своевременное детектирование и локализация отказов имеет особое значение на производстве, так как позволяет предотвратить травмы и возникновение аварийных ситуаций, снизить финансовые потери, что особенно важно на предприятиях критической инфраструктуры [1]. Наличие таких технологий позволяет повысить надежность, своевременно проводить профилактическое обслуживание, эффективно проводить реконфигурацию объектов для быстрого устранения неисправностей.

В соответствии с [2] отказы могут быть классифицированы следующим образом:

— отказ компонента (отклонение параметра объекта от номинального значения или изменение структуры системы);
— отказ датчика (показания датчика не соответствуют измеряемой физической величине);
— отказ актуатора (отклонение сигнала управления от заданного значения).

Самые распространенные методы детектирования и локализации отказов основаны на наблюдателях, анализе соотношений сигналов и алгоритмах идентификации. Методы анализа соотношений базируются на аппаратной или временной избыточности. Аппаратная избыточность заключается в использовании дублирующих устройств. Данный подход обладает высокой эффективностью и не нуждается в наличии модели системы, но требует значительных дополнительных экономических издержек [3]. Также добавление большого количества датчиков может быть невозможно из-за технологических ограничений. Использование временной избыточности основывается на анализе показаний датчиков за некоторый промежуток времени и их сравнении с номинальной моделью. Недостаток данного подхода — наличие достаточно точной модели объекта управления. Методы на основе избыточности показывают высокую эффективность при диагностировании датчиков.

Подходы, основанные на наблюдателях [4], используют разницу между оценками и измеренными значениями переменных состояния (рассогласование) для определения отказов. Как правило, для этого строят генераторы рассогласования [5] — специальные алго-

ритмы, которые позволяют сделать вывод о наличии отказа и его причине по отклонению показаний наблюдателя от измерений. Проблема локализации может быть решена синтезом структурированных генераторов рассогласования, направленных генераторов рассогласования или с помощью специализированных фильтров [6]. Проблема обеспечения робастности в условиях возмущений, шумов и аддитивных нелинейностей может быть решена применением наблюдателей с неизвестным входом [7]. Однако синтез наблюдателя такого типа возможен только для класса линейных систем с существенными ограничениями на матрицы объекта управления. Недостаток данного подхода — потребность в точной модели объекта управления, сложности синтеза при наличии отказов компонентов и построения генераторов рассогласования при множественных отказах.

Идентификационный подход основан на онлайн-оценке параметров объекта управления (например, с использованием градиентного спуска, метода наименьших квадратов, динамического расширения и смешивания регрессора) [8]. Отметим, что не всегда возможно установить однозначную связь между изменением параметра и отказом. Недостаток данного подхода — длительное время реакции.

В [9] рассмотрена задача обнаружения и локализации отказов в системах управления морскими подвижными объектами. В работе проанализирована применимость данного метода для разработки надежной системы автоматического обнаружения и локализации отказов на примере отказов вертикального руля и датчика, измеряющего угол отклонения руля для различных морских судов.

В работе [10] приведены преимущества использования метода измерения во временной области для оперативной локализации отказов сложных компонентов и устройств в полевых условиях. Для реализации метода измерения предпочтительнее применять векторные анализаторы цепей.

В [11] представлен метод обнаружения, локализации и конкретизации отказов исполнительных устройств в замкнутой линейной системе управления авиационным газотурбинным двигателем. Оптимальные наблюдатели гипотез о конкретных отказах исполнительных устройств применяют вместо координат управления таких устройств выбранные заранее постоянные значения, которые ставятся в соответствие конкретным видам отказов каждого устройства.

В работах [12, 13] рассмотрены проблемы разработки систем управления современными авиационными газотурбинными двигателями. Выполнен анализ возможности применения нейронных сетей для диагностики отказов, и приведен алгоритм обнаружения (коррекции) неисправности датчика канала обратной связи на основе нейронной сети. Для данного метода необходимы высокие вычислительные мощности, а также объемные наборы данных для обучения нейронной сети.

На основе перечисленных недостатков и ограничений разработан алгоритм детектирования и локализации отказов актуатора и датчиков для двигателей постоянного тока (ДПТ). Отметим, что наблюдатели с неизвестным входом для данного класса систем не существуют. Описан простой с точки зрения синтеза метод с низкой вычислительной сложностью. Предположено, что двигатель оборудован датчиками скорости и тока. Детектирование отказов основано на наблюдателе Люенбергера полного порядка, а схема локализации – на множестве направленных генераторов рассогласования. Применение предложенного метода возможно для любой наблюдаемой системы второго порядка. Также данный подход может быть распространен на системы старших порядков при соответствующем изменении систем уравнений, решаемых для построения наблюдателей.

### Постановка проблемы

Рассмотрим модель ДПТ, оборудованного датчиками скорости и тока. Динамика двигателя описывается уравнениями:

$$L\frac{di}{dt} + Ri = u - E_b,$$
$$J\dot{\omega} = M - M_f,$$

где $L$ — индуктивность; $R$ — сопротивление якоря; $i$ — сила тока; $u$ — входное напряжение; $E_b$ — ЭДС самоиндукции; $\omega$ — угловая скорость вращения ротора; моменты: $J$ — инерции ротора, $M$ — силы двигателя и $M_f$ — силы трения,

$$E_b = k_b\Phi\omega,$$
$$M = k_m\Phi i,$$
$$M_f = k_f\omega,$$

где $k_b$, $k_m$ и $k_f$ — константы; $\Phi$ — магнитный поток. Предположим, что параметры ДПТ постоянны и известны.

Перепишем уравнения системы в пространстве состояния:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}u, \\ \mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x}, \end{cases} \quad (1)$$

где $\mathbf{x}$, $\mathbf{y}$ — векторы состояния и выходного сигнала; $\mathbf{A}$, $\mathbf{B}$, $\mathbf{C}$ — матрицы системы, управления и выхода:

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} \omega \\ i \end{bmatrix}, \mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{k_f}{J} & \frac{k_m\Phi}{J} \\ -\frac{k_b\Phi}{L} & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 \\ a_3 & a_4 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{L} \end{bmatrix}, \mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Рассмотрим динамику двигателя при следующих отказах: внешний момент силы приложен к ротору (отказ актуатора); отклонение входного напряжения (отказ актуатора); отказ датчика скорости; отказ датчика тока.

Отклонение момента силы и напряжения классифицированы как отказы актуатора, так как они напрямую действуют на производные вектора состояния.

Отклонение величины напряжения от заданного значения, превышающее некоторое пороговое значение, устанавливаемое оператором. Как правило, оно должно быть выше амплитуды шумов, чтобы предотвратить ложное срабатывание.

Модель (1) в случае наличия перечисленных отказов описывается системой уравнений

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}u + \begin{bmatrix} \frac{1}{J} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{a1} \\ f_{a2} \end{bmatrix}, \\ \mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{s1} \\ f_{s2} \end{bmatrix}, \end{cases} \quad (2)$$

где $f_{a1}$ — внешний момент силы; $f_{a2}$ — отклонение напряжения; $f_{s1}$ — сигнал отказа датчика скорости; $f_{s2}$ — сигнал отказа датчика тока. Данные сигналы неизвестны.

Структурная схема исследуемой модели приведена на рис. 1.

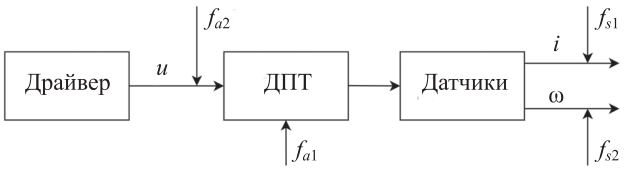



*Рис. 1*. Структурная схема модели исследуемого объекта

*Fig. 1*. Structural scheme of plant model

### Схема детектирования и локализации

Основой разрабатываемого подхода является наблюдатель состояния Люенбергера полного порядка [14]:

$$\begin{cases} \dot{\hat{\mathbf{x}}} = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}} + \mathbf{B}u + \mathbf{K}(\mathbf{y} - \hat{\mathbf{y}}), \\ \hat{\mathbf{y}} = \mathbf{C}\hat{\mathbf{x}}, \end{cases} \quad (3)$$

где $\hat{\mathbf{x}}$ и $\hat{\mathbf{y}}$ — оценки векторов состояния и выходных сигналов; $\mathbf{K} = \begin{bmatrix} k_1 & k_2 \\ k_3 & k_4 \end{bmatrix}$ — матрица наблюдателя.

Сигнал рассогласования выберем как разницу между выходным сигналом объекта и выходом наблюдателя (3):

$$\mathbf{r} = \mathbf{y} - \hat{\mathbf{y}} = \mathbf{C}(\mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}}) = \mathbf{C}\mathbf{e} = \mathbf{y} - \mathbf{C}\hat{\mathbf{x}},$$

где $\mathbf{e}$ — ошибка оценки.

Динамическая модель сигнала рассогласования имеет вид:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{e}} = (\mathbf{A} - \mathbf{K}\mathbf{C})\mathbf{e} + \mathbf{I}_\mathbf{i} f_i, \\ \mathbf{r} = \mathbf{C}\mathbf{e}, \end{cases}$$

где вектор $\mathbf{I}_\mathbf{i}$ определяет направление отказа в пространстве рассогласования; $f_i$ — $i$-й сигнал отказа.

Для решения поставленной задачи необходимо разработать алгоритм синтеза $\mathbf{K}$ для каждого отказа, обеспечивающий выполнение следующих условий [3].

**Условие 1.** $\text{rank}[\mathbf{I}_\mathbf{i}; (\mathbf{A} - \mathbf{K}\mathbf{C})\mathbf{I}_\mathbf{i}] = 1$ для обеспечения изменения сигнала рассогласования при отказе строго вдоль одного вектора в пространстве рассогласования.

**Условие 2.** Матрица $(\mathbf{A} - \mathbf{K}\mathbf{C})$ должна быть гурвицева для обеспечения устойчивости наблюдателя.

**Условие 3.** Все векторы $\mathbf{C}\mathbf{I}_\mathbf{i}$ должны быть линейно независимы для разделимости отказов.

Отметим, что одновременные отказы могут быть разделены, если все наблюдатели удовлетворяют *Условиям 1–3*.

### Детектирование и локализация отказа по внешнему моменту сил, приложенному к ротору

Построим алгоритм синтеза наблюдателя для каждого отказа и разработаем схему локализации на базе рассогласования сигналов (рис. 2). Выполним анализ динамики ДПТ при различных сбоях.

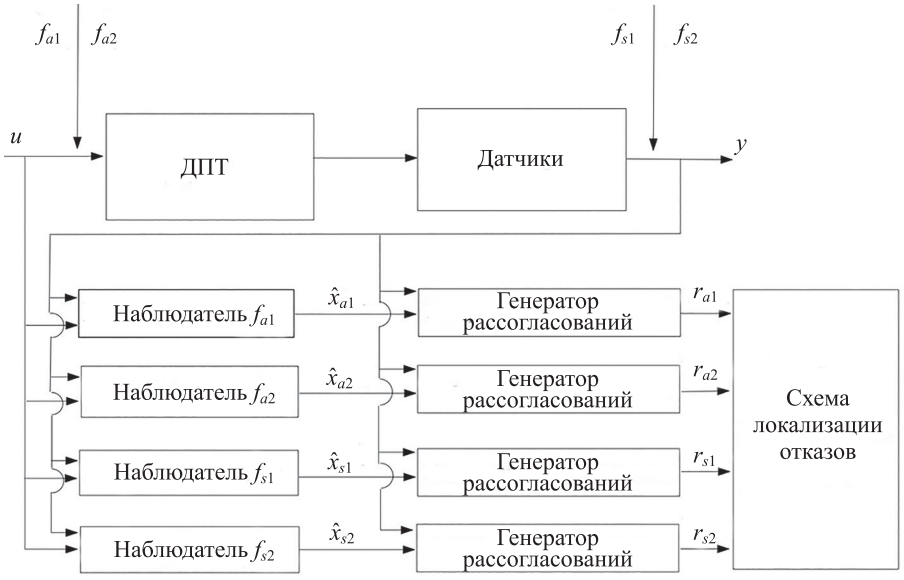



*Рис. 2*. Схема детектирования и локализации отказов

*Fig. 2*. Fault detection and isolation scheme

Отказ по внешнему моменту сил, приложенному к ротору, происходит, когда некоторая неучтенная сила воздействует на вращающиеся механические части (например, увеличивается сила трения в связи с износом подшипников или возникает внешний момент сил из-за механической поломки и т. д.). Динамика ошибки имеет вид:

$$\dot{\mathbf{e}} = (\mathbf{A} - \mathbf{KC})\mathbf{e} + \mathbf{I_{a1}} f_{a1},$$
$$\mathbf{I_{a1}^T} = \begin{bmatrix} \frac{1}{J} & 0 \end{bmatrix} = [l_1 \quad 0], \tag{4}$$

где $f_{a1}$ — внешняя сила, действующая на ротор.

Рассмотрим *Условие 1*:

$$rank[\mathbf{I_{a1}}; (\mathbf{A} - \mathbf{KC})\mathbf{I_{a1}}] = rank \begin{bmatrix} \frac{1}{J} & (a_1 - k_1)l_1 \\ 0 & (a_3 - k_3)l_1 \end{bmatrix} = 1.$$

Оно выполняется, если $k_3 = a_3$:

$$rank \begin{bmatrix} \frac{1}{J} & (a_1 - k_1)l_1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} = 1.$$

Рассмотрим *Условие 2*. Характеристический полином уравнения (4) имеет вид:

$$p_{a1} = \det(s\mathbf{I} - (\mathbf{A} - \mathbf{KC})) = s^2 + ms + n,$$

где $s$ — комплексная переменная,

$$m = k_1 - a_1 - a_4 + k_4, \tag{5}$$
$$n = k_1 a_4 - a_1 a_4 + k_1 k_4 - a_1 k_4 - k_2 k_3 + a_2 k_3 + a_3 k_2 - a_2 a_3.$$

Характеристический многочлен не зависит от $k_2$, так как $k_2 k_3 = a_3 k_2$ и $a_2 k_3 = a_2 a_3$. Таким образом, определим $k_2 = 0$. Выберем положительное значение $n$, $m$ для обеспечения желаемого поведения наблюдателя и завершения вычисления $\mathbf{K}$ путем решения уравнений (5) относительно $k_1$, $k_4$.

*Условие 3* выполняется, так как рассматривается только один вектор направления рассогласования.

### Детектирование и локализация отказа при отклонении напряжения

Отказ при отклонении напряжения возникает из-за сбоя в электронных схемах или источнике питания (например, сбой транзистора в драйвере двигателя или влияние мощного внешнего магнитного поля). Динамика ошибки наблюдения принимает форму

$$\dot{\mathbf{e}} = (\mathbf{A} - \mathbf{KC})\mathbf{e} + \mathbf{I_{a2}} f_{a2},$$
$$\mathbf{I_{a2}^T} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{L} \end{bmatrix} = [0 \quad l_2], \tag{6}$$

где $f_{a2}$ — аддитивное напряжение, подаваемое на вход ДПТ.

Рассмотрим *Условие 1*:

$$rank[\mathbf{I_{a2}}; (\mathbf{A} - \mathbf{KC})\mathbf{I_{a2}}] = rank \begin{bmatrix} 0 & (a_2 - k_2)l_2 \\ \frac{1}{L} & (a_4 - k_4)l_2 \end{bmatrix} = 1.$$

*Условия 1* выполняется, если $k_2 = a_2$:

$$rank \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{1}{L} & (a_4 - k_4)l_2 \end{bmatrix} = 1.$$

Рассмотрим *Условие 2*. Характеристический многочлен модели ошибок (6) такой же, как и для случая отказа по внешнему моменту сил (5). Он не зависит от $k_3$, так как все слагаемые с $k_3$ сокращаются из-за $k_2 = a_2$. Таким образом, определим $k_3 = 0$. Выберем положительные значения $n$ и $m$, для обеспечения требуемого поведения наблюдателя с помощью процедуры определения требуемых полюсов и завершения расчета $\mathbf{K}$ решением уравнений (5) относительно $k_1$, $k_4$.

*Условие 3* выполняется, поскольку направления $\mathbf{I_{a1}}$ и $\mathbf{I_{a2}}$ ортогональны.

### Детектирование отказа датчика скорости

Тип отказа датчика скорости возникает из-за механического или электронного сбоя в датчике скорости или его каналах передачи данных. Наиболее часто сбой проявляется как «залипание» показаний или умножение реального значения на некоторую константу. С учетом системы уравнений (2) динамическая модель ошибки наблюдения имеет вид:

$$\dot{\mathbf{e}} = (\mathbf{A} - \mathbf{KC})\mathbf{e} + \mathbf{I_{s1}} f_{s1},$$
$$\mathbf{I_{s1}} = \mathbf{KC} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_1 \\ k_3 \end{bmatrix},$$

где $f_{s1}$ — сигнал отказа датчика скорости.

Направления рассогласования $\mathbf{I_{a1}}$ и $\mathbf{I_{a2}}$ — базисные в двумерном пространстве. Следовательно, невозможно построить одновременно линейно независимый $\mathbf{I_{s1}}$ по отношению к $\mathbf{I_{a1}}$ и $\mathbf{I_{a2}}$. Выберем следующее направление рассогласования $\mathbf{I_{s1}^T} = [k_1 \;\; k_3] = [1 \quad 1]$. Если сигнал рассогласования изменяется вдоль выбранного направления, то будет более вероятным. Также можно обеспечить его локализацию одновременно с одним из отказов актуатора.

Рассмотрим *Условие 1*:

$$rank[\mathbf{I_{s1}}; (\mathbf{A} - \mathbf{KC})\mathbf{I_{s1}}] =$$
$$= rank \begin{bmatrix} k_1 & (a_1 - k_1)k_1 + (a_2 - k_2)k_3 \\ k_3 & (a_3 - k_3)k_1 + (a_4 - k_4)k_3 \end{bmatrix} = 1.$$

Невозможно выбрать такие $k_2$ и $k_4$, чтобы столбцы были линейно зависимыми, как в случае отказа актуатора. Так как в этом случае наблюдатель имеет нулевой полюс. Для выполнения требования обеспечим линейную зависимость строк:

$$\frac{k_1}{k_3} = \frac{(a_1 - k_1)k_1 + (a_2 - k_2)k_3}{(a_3 - k_3)k_1 + (a_4 - k_4)k_3}. \tag{7}$$

Рассчитаем $k_2$ как решение уравнения (7):

$$k_2 = \frac{a_1 k_1 k_3 + a_2 k_3^2 - a_3 k_1^2 - a_4 k_1 k_3 + k_1 k_3 k_4}{k_3^2}.$$

Последний коэффициент $k_4$ рассчитывается для удовлетворения *Условию 2* с использованием характеристического полинома (5).

Невозможно обеспечить *Условие 3* для всех одновременных отказов, но предлагаемая схема позволяет локализовать отказ датчика скорости одновременно с одним из отказов актуатора.

### Детектирование и локализация отказа датчика тока

Причины отказов датчика тока идентичны, как и для датчика скорости. Динамика ошибки описывается уравнениями

$$\dot{\mathbf{e}} = (\mathbf{A} - \mathbf{KC})\mathbf{e} + \mathbf{I_{s2}} f_{s2},$$
$$\mathbf{I_{s2}} = \mathbf{KC}\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_2 \\ k_4 \end{bmatrix},$$

где $f_{s2}$ — сигнал отказа датчика тока.

Выберем направление отказа $\mathbf{I}_{\mathbf{s2}}^{\boldsymbol{T}} = [k_2 \;\; k_4] = [2 \; -1]$, которое линейно независимо от одного из предыдущих отказов (*Условие 3* частично выполнено).

Рассмотрим *Условие 1*:

$$rank[\mathbf{I_{s2}}; (\mathbf{A} - \mathbf{KC})\mathbf{I_{s2}}] =$$
$$= rank\begin{bmatrix} k_2 & (a_1 - k_1)k_2 + (a_2 - k_2)k_4 \\ k_4 & (a_3 - k_3)k_2 + (a_4 - k_4)k_4 \end{bmatrix} = 1.$$

Тогда:

$$\frac{k_2}{k_4} = \frac{(a_1 - k_1)k_2 + (a_2 - k_2)k_4}{(a_3 - k_3)k_2 + (a_4 - k_4)k_4}. \qquad (8)$$

Рассчитаем $k_3$ как решение (8):

$$k_3 = \frac{a_2 k_3^2 + a_4 k_2 k_4 + a_1 k_2 k_4 - a_2 k_4^2 - k_1 k_2 k_4}{k_2^2}.$$

Последний коэффициент выбирается так, чтобы удовлетворять *Условию 2* с использованием характеристического полинома (5).

### Алгоритм локализации

Предложим алгоритм, который позволит детектировать и локализовать отказы с использованием коэффициента, характеризующего соотношения направлений между вектором рассогласования **r** и направлениями отказов $\mathbf{I_i}$, аналогично [7]:

$$C_i = \frac{|\mathbf{I}_\mathbf{i}^T \mathbf{r}|}{\|\mathbf{I}_\mathbf{i}^T\|_2 \|\mathbf{r}\|_2}.$$

Коэффициент $C_i$ обозначает нормализованное значение проекции рассогласования на направление отказа. Если $C_i > C_j$ то отказ $i$ более вероятен, чем $j$. Для описанного ДПТ наиболее вероятный отказ соответствует $\max(C_i)$, $i = \{\mathbf{I_{a1}}, \mathbf{I_{a2}}, \mathbf{I_{s1}}, \mathbf{I_{s2}}\}$.

Робастность по отношению к шумам может быть обеспечена с помощью порогового значения:

$$\mathbf{r} = \begin{cases} \mathbf{r}, \textit{ если } |\mathbf{r}| \geq \Delta, \\ 0, \textit{ если } |\mathbf{r}| \leq \Delta, \end{cases}$$

где $\Delta$ — величина порогового значения.

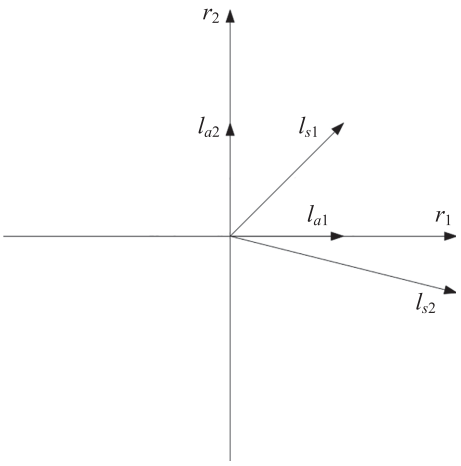



*Рис. 3*. Направления отказов в пространстве рассогласования

*Fig. 3*. Fault directions in the residual space

Проблему нечувствительности к параметрическим неопределенностям можно преодолеть с помощью алгоритмов идентификации. В этом случае матрица наблюдателя становится зависимой от динамически оцениваемых параметров объекта управления для выполнения всех необходимых условий.

Отметим, что *Условие 3* не выполняется для всех возможных одновременных отказов. Следовательно, предлагаемая схема может привести к ошибкам локализации в случаях множественных отказов. Например, два одновременных отказа актуатора приводят к увеличению рассогласования в направлении отказа датчика. Однако на практике такая ситуация маловероятна, и алгоритм детектирования остается работоспособным.

### Результаты моделирования

Для моделирования выбран ДПТ RK 370CA. В соответствии с рис. 1, на двигатель подается напряжение от драйвера и внешний момент сил, выходными сигналами являются показания датчиков скорости и тока. Двигатель имеет следующую модель пространства состояния [15]:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -2{,}0778 \times 10^4 & 2{,}644 \times 10^4 \\ -0{,}2474 & -180{,}5054 \end{bmatrix},$$
$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 10{,}618 \end{bmatrix}, \mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Найдем направления отказов актуатора с помощью (5) и (6):

$$\mathbf{I_{a1}} = \begin{bmatrix} 1{,}11 \times 10^6 \\ 0 \end{bmatrix}, \mathbf{I_{a2}} = \begin{bmatrix} 0 \\ 10{,}618 \end{bmatrix}.$$

Выберем собственные значения наблюдателей, равные –5, и рассчитаем матрицы наблюдателей на основе (5) и желаемого характеристического полинома:

$$\mathbf{K_{a1}} = \begin{bmatrix} -2{,}0773 \times 10^4 & 0 \\ -0{,}2474 & -175{,}5054 \end{bmatrix},$$
$$\mathbf{K_{a2}} = \begin{bmatrix} -2{,}0773 \times 10^4 & 2{,}644 \times 10^4 \\ 0 & -175{,}5054 \end{bmatrix}.$$

Определим различные направления отказа датчика, не совпадающие с направлениями отказа актуатора:

$$\mathbf{I_{s1}} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}, \mathbf{I_{s2}} = \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Соответствующие (9) матрицы расчета наблюдателя принимают вид:

$$\mathbf{K_{s1}} = \begin{bmatrix} 1 \times 10^4 & 5{,}8484 \times 10^3 \\ 1 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{K_{s2}} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -141{,}2927 & -1 \end{bmatrix}.$$

ДПТ запускается из состояния покоя. После 0,03 с переходного процесса двигатель начинает работать в установившемся режиме до момента отказа. Время начала отказа выбрано произвольным для разных случаев отказа с целью демонстрации инвариантности алгоритма по отношению к данному фактору.

На рис. 4, *a* показаны выходные сигналы двигателя (сила тока $i(t)$ и скорость $\omega(t)$) при отказе по внешнему моменту сил спустя 0,4 с после начала моделирования.

Сигнал отказа имеет постоянную амплитуду и увеличивает скорость ДПТ. Соответствующие коэффициенты направлений $C_{a1}$, $C_{a2}$, $C_{s1}$, $C_{s2}$ показаны на рис. 4, *b*. Наибольшее значение $C_{a1}$ соответствует отказу двигателя.

Случай отказа при отклонении напряжения показан на рис. 5, где представлены измеряемые выходные сигналы двигателя и соотношения направлений при возникновении отказа при отклонении напряжения с 0,4 с. Сигнал отказа представляет собой дополнительное гармоническое напряжение, подаваемое на вход двигателя. Коэффициент направлений позволяет локализовать отказ. Однако сигнал отказа ослабевает, когда гармоника близка к нулевому значению.

Случай отказа датчика скорости показан на рис. 6, где представлены измеряемые выходные сигналы двигателя и коэффициенты направлений при мультипликативном отказе датчика скорости в 0,6 с. Отказ происходит из-за умножения измеренного значения, которое может быть вызвано искажением информационных фрагментов. Предложенная схема позволяет локализовать отказ этого датчика.

Случай отказа датчика тока показан на рис. 7, где представлены измеряемые выходные сигналы двигателя и коэффициенты направлений при мультипликативном отказе датчика тока в 0,6 с.

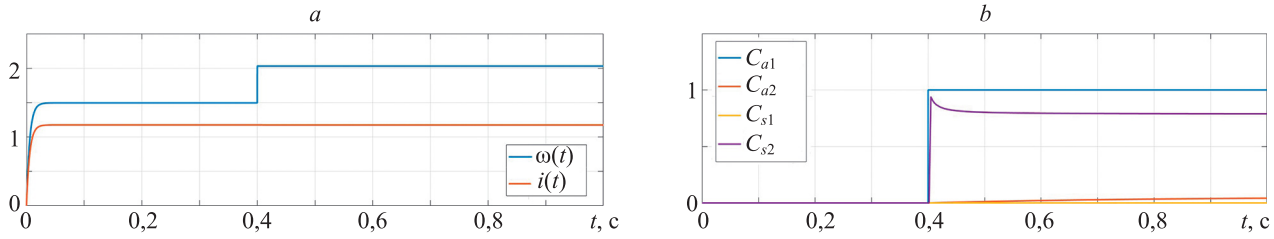



*Рис. 4*. Случай отказа по внешнему моменту сил: выходные сигналы двигателя (*a*); коэффициенты направлений (*b*)

*Fig. 4*. Case of external force momentum fault: motor output signals (*a*); direction coefficients (*b*)

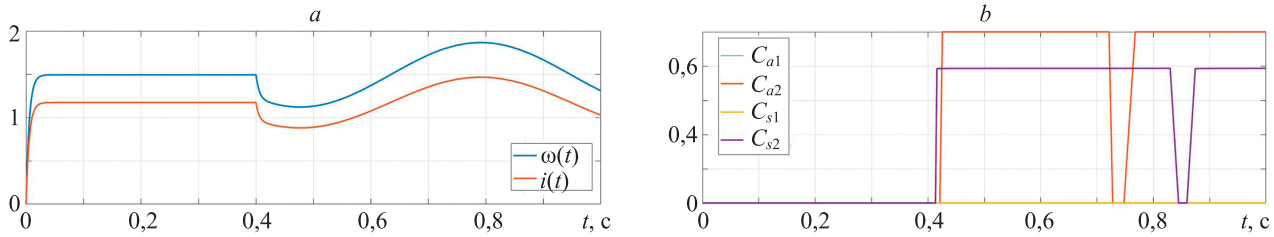



*Рис. 5*. Случай отказа при отклонении напряжения: выходные сигналы двигателя (*a*); коэффициенты направлений (*b*)

*Fig. 5*. Case of voltage deviation fault: motor output signals (*a*); direction coefficients (*b*)

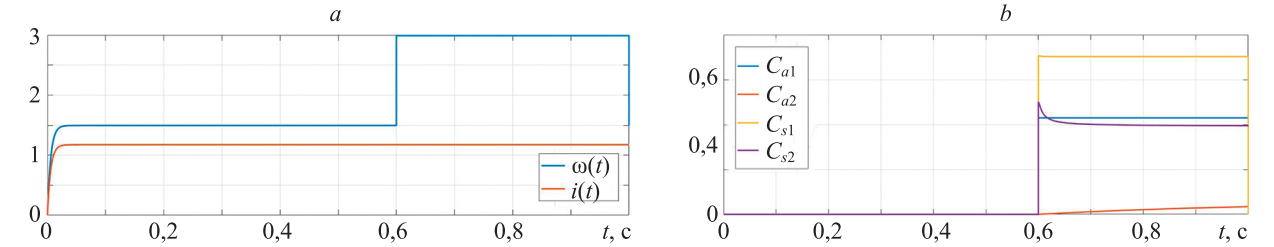



*Рис. 6*. Случай мультипликативного отказа датчика скорости: выходные сигналы двигателя (*a*); коэффициенты направлений (*b*)

*Fig. 6*. Case of velocity sensor multiplicative fault: motor output signals (*a*); direction coefficients (*b*)

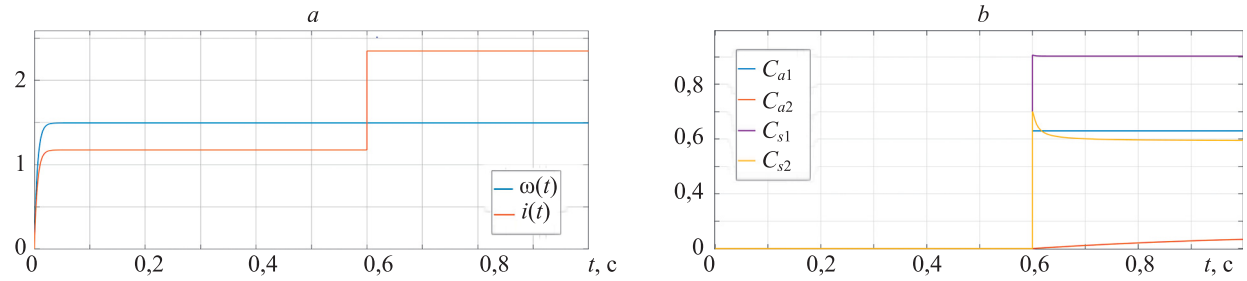



*Рис. 7.* Случай мультипликативного отказа датчика тока: выходные сигналы двигателя (*a*); коэффициенты направлений (*b*)

*Fig. 7.* Case of current sensor multiplicative fault: motor output signals (*a*); direction coefficients (*b*)

Результаты компьютерного моделирования подтверждают эффективность предложенного подхода. Под эффективностью подразумевается корректность детектирования состояния двигателя (наличие отказа), а также верная локализация причины отказа.

## Заключение

Предложен алгоритм детектирования и локализации отказов актуатора и датчиков для двигателя постоянного тока. Принято, что двигатель оснащен датчиками скорости и тока. Алгоритм детектирования основан на наблюдателе Люенбергера полного порядка. Схема локализации использует направленные генераторы рассогласования и соотношения их выходов с направлениями отказов. Описанное решение позволяет определять отказы по внешнему моменту сил, приложенному к ротору; при отклонении величины напряжения от заданного значения, превышающее пороговое значение; датчика скорости; датчика тока.

Предложенное решение отличается использованием банка наблюдателей для локализации отказов, простым алгоритмом его построения и синтеза генераторов рассогласования. Результаты моделирования подтверждают эффективность предложенного подхода. Представленный метод обеспечивает онлайн-локализацию отказов и не требует дополнительных средств измерения, что позволяет сократить расходы на диагностику, сэкономить время ремонта и обслуживания, своевременно обнаруживать аварии. Также алгоритм позволяет детектировать и локализовывать отказы как по входным, так и по выходным сигналам при тривиальной процедуре синтеза.

Устойчивость по отношению к шуму достигается за счет использования порогового значения рассогласования. Нечувствительность к параметрическим неопределенностям может быть достигнута с помощью методов идентификации параметров (градиентный спуск, метод наименьших квадратов, метод динамического расширения регрессора и т. д.).

Рассмотренное решение применимо для любой наблюдаемой системы второго порядка и для объектов старшего порядка при соответствующем изменении систем уравнений, решаемых для построения наблюдателей.

## Литература


1. Chen J., Patton R.J. Robust Model-Based Fault Diagnosis for Dynamic Systems. Springer Science & Business Media, 2012. 356 p.
2. Wünnenberg J. Observer-based Fault Detection in Dynamic Systems. VDI Verlag, 1990. 127 p.
3. Аверьянов А.В., Барановский А.М., Эсаулов К.А. Анализ пределов аппаратной избыточности системы автоматизированного дистанционного управления военного назначения // I-METHODS. 2015. Т. 7. № 4. С. 16–20.
4. Chen J., Patton R., Zhang H.-Y. Design of unknown input observers and robust fault detection filters // International Journal of Control. 1996. V. 63. N 1. P. 85–105. https://doi.org/10.1080/00207179608921833
5. Козлов Д.С., Тюменцев Е.В. Нейросетевые методы обнаружения отказов датчиков и приводов летательного аппарата // Труды МАИ. 2019. № 52. С. 2.
6. Коровкин М.В., Сотникова М.В. Обнаружение и локализация отказов в системах управления морскими подвижными объектами // Системы управления и информационные технологии. 2013. № 4. С. 91–94.
7. Oh K.S., Song T.J., Lee J.M., Yoon Y.M., Yi K.S. Sliding mode observer based fault detection and isolation algorithm of sensor for longitudinal autonomous driving using V2V communication // Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers, A. 2019. V. 43. N 98. P. 599–609. (in Korean). https://doi.org/10.3795/KSME-A.2019.43.9.599


## References


1. Chen J., Patton R.J. *Robust Model-Based Fault Diagnosis for Dynamic Systems*. Springer Science & Business Media, 2012, 356 p.
2. Wünnenberg J. *Observer-based Fault Detection in Dynamic Systems*. 1990, VDI Verlag, 127 p.
3. Averyanov A.V., Baranovsky A.M., Esaulov K. Analysis of hardware redundancy limits of the system of automated remote management, military. *I-METHODS*, 2015, vol. 7, no. 4, pp. 16–20. (in Russian)
4. Chen J., Patton R., Zhang H.-Y. Design of unknown input observers and robust fault detection filters. *International Journal of Control*, 1996, vol. 63, no. 1, pp. 85–105. https://doi.org/10.1080/00207179608921833
5. Kozlov D.S., Tiumentsev Y.V. Neural network techniques for fault identification of aircraft sensors and actuators. *Trudy MAI*, 2019, no. 52, pp. 2. (in Russian)
6. Korovkin M.V., Sotnikova M.V. Failure detection and localization in the control systems of marine mobile objects. *Sistemy upravlenija i informacionnye tehnologii*, 2013, no. 4, pp. 91–94. (in Russian)
7. Oh K.S., Song T.J., Lee J.M., Yoon Y.M., Yi K.S. Sliding mode observer based fault detection and isolation algorithm of sensor for longitudinal autonomous driving using V2V communication. *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers, A*, 2019, vol. 43, no. 98, pp. 599–609. (in Korean). https://doi.org/10.3795/KSME-A.2019.43.9.599
8. Zhao R., Wu Y. Intelligent fault detection and diagnosis method for automatic control system based on reinforcement learning. *Lecture*

8. Zhao R., Wu Y. Intelligent fault detection and diagnosis method for automatic control system based on reinforcement learning // Lecture Notes in Electrical Engineering. 2021. V. 747. P. 1459–1467. https://doi.org/10.1007/978-981-16-0115-6_167
9. Zhang Y., Wang K., Qian X., Gendeel M. Robust fault-detection based on residual K–L divergence for wind turbines // IET Renewable Power Generation. 2019. V. 13. N 13. P. 2400–2408. https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2018.6190
10. Lim J.K., Park C.G. Satellite fault detection and isolation scheme with modified adaptive fading EKF // Journal of Electrical Engineering and Technology. 2014. V. 9. N 4. P. 1401–1410. https://doi.org/10.5370/jeet.2014.9.4.1401
11. Захаров Н.А., Калин С.В., Клепиков В.И., Подхватилин Д.С. Алгоритмическое обеспечение отказоустойчивости распределенных систем управления // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. 2008. № 7(34). С. 43–48.
12. Лейбов Р.Л. Обнаружение, локализация и конкретизация отказов исполнительных устройств линейной системы управления // Авиакосмическое приборостроение. 2012. № 8. С. 26–35.
13. Кузнецова Т.А., Августинович В.Г. Применение нейронной сети для диагностики отказов датчиков канала обратной связи САУ ГТД // Научно-технический вестник Поволжья. 2017. № 4. С. 131–133. https://doi.org/10.24153/2079-5920-2017-7-4-131-133
14. Adouni A., Abid A., Sbita L. A DC motor fault detection, isolation and identification based on a new architecture Artificial Neural Network // Proc. of the 5th International Conference on Systems and Control (ICSC). 2016. P. 294–299. https://doi.org/10.1109/ICoSC.2016.7507054
15. Santos L.I., Palhares R., D'Angelo M., Mendes J.B., Veloso R., Ekel P. A new scheme for fault detection and classification applied to dc motor // Trends in Computational and Applied Mathematics. 2018. V. 19. N 2. P. 327–345. https://doi.org/10.5540/tema.2018.019.02.327

*Notes in Electrical Engineering*, 2021, vol. 747, pp. 1459–1467. https://doi.org/10.1007/978-981-16-0115-6_167
9. Zhang Y., Wang K., Qian X., Gendeel M. Robust fault-detection based on residual K–L divergence for wind turbines. *IET Renewable Power Generation*, 2019, vol. 13, no. 13, pp. 2400–2408. https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2018.6190
10. Lim J.K., Park C.G. Satellite fault detection and isolation scheme with modified adaptive fading EKF. *Journal of Electrical Engineering and Technology*, 2014, vol. 9, no. 4, pp. 1401–1410. https://doi.org/10.5370/jeet.2014.9.4.1401
11. Zakharov N., Kalin S., Klepikov V., Podkhvatilin D. Algorithmic providing of fault tolerance of the distributed controlling systems. *Radioelectronic and Computer Systems*, 2008, no. 7(34), pp. 43–48. (in Russian)
12. Leibov R.L. Control system actuator failures detection, isolation and concrete definition. *Aerospace Instrument-Making*, 2012, no. 8, pp. 26–35. (in Russian)
13. Kuznetsova T.A., Augustinovich V.G. The neural network application for fault diagnostics of feedback channels' sensor in automatic control systems of modern aircraft gas-turbine engines. *Scientific and Technical Volga region Bulletin*, 2017, no. 4, pp. 131–133. (in Russian). https://doi.org/10.24153/2079-5920-2017-7-4-131-133
14. Adouni A., Abid A., Sbita L. A DC motor fault detection, isolation and identification based on a new architecture Artificial Neural Network. *Proc. of the 5th International Conference on Systems and Control (ICSC)*, 2016, pp. 294–299. https://doi.org/10.1109/ICoSC.2016.7507054
15. Santos L.I., Palhares R., D'Angelo M., Mendes J.B., Veloso R., Ekel P. A new scheme for fault detection and classification applied to dc motor. *Trends in Computational and Applied Mathematics*, 2018, vol. 19, no. 2, pp. 327–345. https://doi.org/10.5540/tema.2018.019.02.327

## Авторы

**Колесник Никита Сергеевич** — стажер-исследователь, Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург, 199178, Российская Федерация, https://orcid.org/0000-0002-8630-4202, nik.kolesnik.1998@mail.ru

**Маргун Алексей Анатольевич** — кандидат технических наук, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация; исследователь, Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург, 199178, Российская Федерация, SC 55521791600, https://orcid.org/0000-0002-5333-0594, alexeimargun@gmail.com

## Authors

**Nikita S. Kolesnik** — Research Assistant, Institute for Problems in Mechanical Engineering of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, 199178, Russian Federation, https://orcid.org/0000-0002-8630-4202, nik.kolesnik.1998@mail.ru

**Alexey A. Margun** — PhD, Associate Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation; Researcher, Institute for Problems in Mechanical Engineering of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, 199178, Russian Federation, SC 55521791600, https://orcid.org/0000-0002-5333-0594, alexeimargun@gmail.com

*Статья поступила в редакцию 25.11.2021*
*Одобрена после рецензирования 09.04.2022*
*Принята к печати 19.05.2022*

*Received 25.11.2021*
*Approved after reviewing 09.04.2022*
*Accepted 19.05.2022*

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ
май–июнь 2022 Том 22 № 3 http://ntv.ifmo.ru/
SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL OF INFORMATION TECHNOLOGIES, MECHANICS AND OPTICS
May–June 2022 Vol. 22 No 3 http://ntv.ifmo.ru/en/
ISSN 2226-1494 (print) ISSN 2500-0373 (online)

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК УНИВЕРСИТЕТ ИТМО
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ

doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-3-501-508

# Synthesis and implementation of λ-approach of slide control in heat-consumption system

**Aleksandr A. Shilin[1], Viktor G. Bukreev[2]✉, Filipp V. Perevoshchikov[3]**

[1,2,3] National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, 634050, Russian Federation
[1] LLC "NPO VEST", Tomsk, 634009, Russian Federation

[1] shilin@tpu.ru, https://orcid.org/0000-0002-4761-7249
[2] bukreev@tpu.ru✉, https://orcid.org/0000-0001-9861-9765
[3] fvp2@tpu.ru, https://orcid.org/0000-0002-7932-2744

**Abstract**

The paper proposes an essentially new approach to synthesis and implementation of dynamic objects with three-position relay control. The approach consists in organization of differentiation procedure on the relay element involved into feedback. We considered synthesis of the relay element feedback in tasks of robust and time optimal control of heat-consumption systems. To demonstrate the effectiveness of the proposed approach, a comparative assessment of the results of modeling heat consumption systems with three-position relay control and a traditional linear–quadratic regulator is presented. We attached transient processes plots of active heat-consumption systems which confirm the effectiveness of the synthesized relay control.

**Keywords**

heat-consumption systems, lambda-regulator, sliding mode, time optimal control, three-position relay control

**For citation:** Shilin A.A., Bukreev V.G., Perevoshchikov F.V. Synthesis and implementation of λ-approach of slide control in heat-consumption system. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2022, vol. 22, no. 3, pp. 501–508. doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-3-501-508

УДК 681.584

# Синтез и реализация λ-подхода скользящего управления в системе теплопотребления

**Александр Анатольевич Шилин[1], Виктор Григорьевич Букреев[2]✉, Филипп Владимирович Перевощиков[3]**

[1,2,3] Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, 634050, Российская Федерация
[1] ООО «НПО ВЭСТ», Томск, 634009, Российская Федерация

[1] shilin@tpu.ru, https://orcid.org/0000-0002-4761-7249
[2] bukreev@tpu.ru✉, https://orcid.org/0000-0001-9861-9765
[3] fvp2@tpu.ru, https://orcid.org/0000-0002-7932-2744

**Аннотация**

**Предмет исследования.** Предложен новый подход к синтезу и реализации трехпозиционного релейного управления сложными динамическими объектами. Рассмотрена методика синтеза обратной связи релейного элемента в задачах робастного и оптимального по быстродействию управления системами теплопотребления. **Методы.** Представленный подход заключается в организации процедуры дифференцирования на релейном элементе, включенным в обратную связь системы управления. **Основные результаты.** Для демонстрации эффективности подхода выполнена сравнительная оценка результатов моделирования систем теплопотребления с релейным трехпозиционным управлением и традиционным линейно-квадратичным регулятором. Показаны графики переходных процессов действующих систем, которые подтверждают эффективность синтезированного

© Shilin A.A., Bukreev V.G., Perevoshchikov F.V., 2022

релейного управления. **Практическая значимость.** Результаты работы найдут применение при разработке алгоритмов управления системами теплопотребления зданий и сооружений.

**Ключевые слова**
системы теплопотребления, лямбда-регулятор, скользящий режим, оптимальное по быстродействию управление, трехпозиционное релейное управление

**Ссылка для цитирования:** Шилин А.А., Букреев В.Г., Перевощиков Ф.В. Синтез и реализация λ-подхода скользящего управления в системе теплопотребления // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2022. Т. 22, № 3. С. 501–508 (на англ. яз.). doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-3-501-508

## Introduction

The article considers the problem of synthesis of relay control for a three-position valve of a heat consumption system. Traditionally, such systems use a classic proportional-integral-derivative (PID) controller together with a pulse-width modulator for three-position control of the actuator. When solving problems of improving the quality of control of various non-stationary and non-linear objects, there are issues of practical application of modern methods for the synthesis of such controllers where estimates of the derivatives of the measured state variables are used. This is due not only to the presence of various noises and interferences in the measuring channels, but also to the insufficient bit grid of analog-to-digital converters [1].

During the operation of many control objects, including heat consumption systems, their parameters can change significantly. The use of regulators with robust properties [2] allows, in many cases, to provide the required quality indicators. An important place in the quality criteria is occupied by the requirement for the maximum speed of the control system, which can be performed on the basis of relay controllers.

In the scientific literature, you can find solutions where relay control is synthesized using modern approaches. For example, in works [3, 4], variable structures are used to form a relay law, however, such solutions are aimed at a certain type of control object. Robust properties can also be provided by applying sliding control [5–8]. The most studied are control systems for objects of the 2nd order [9, 10] where the switching line is determined on the phase trajectory [11, 12]. For objects of a higher order with a delay, it is possible to use proven solutions for 2nd order control objects, but the problem of chaterring inevitably arises, the studies of which are devoted to the works [13–15]. A good result can be achieved by generating multi-level control values [16] or quasi-sliding modes with a dead zone [17]. However, such solutions are more limited by the complexity of calculating the derivative of the measured state variable of the control object with discretization errors by level.

Of particular interest are variants of optimal control in terms of speed [18] where the switching line is organized in the phase space [17, 19]. Therefore, it can be assumed that there is a generalized solution for finding the sliding line [20] in a simpler way which has the robust properties of the sliding mode, and, at the same time, provides optimal control in terms of speed. In the paper, the authors propose a similar generalized approach that allows synthesizing a three-position control without estimating the derivative of the measured object state variable.

## Generalized solution of optimal and robust control

The linearized mathematical model for equilibrium states of such objects in operator form relative to the position of control valve stem can be written in the following way [21]:

$$W(s) = \frac{k_o(t, x)}{T_v s} \times \frac{\exp(-\tau(t, s)s)}{1 + T_o(t, x)s}, \quad (1)$$

where $T_v$ is duration of the valve rod shift; $s$ is Laplace transformation operator. The duration $\tau(t, s)$ of transport delay, coefficient $k_o(t, x)$ of transmission and object time $T_o(t, x)$ have a complex dependence on the variables state $x(t)$, and it is ordinarily unsteady.

For this class of objects there is some problem of using of classic methods for optimal control synthesis in construction of regulators based on library modules of a programmable logic controller (PLC).

As an alternative direction, let us consider methods of robust control in sliding mode and time optimal control. Taking as a base the research results of robust control systems in sliding mode [9], we can use the condition of attraction to the sliding trajectory in boundary modes and assume the existence of time optimal conditions. Thus, the object (1) without delay is a special case of mathematical model:

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = x_2(t), \\ \dot{x}_2(t) = -h(x, t)x_2 + g(x, t)u(t), \end{cases} \quad (2)$$

where $g(x, t)$ and $h(x, t)$ are positively defined parameters of the objects. For this model there is control

$$u(t) = -sign(a_1 x_1(t) + x_2(t)), \quad (3)$$

where $a_1$ is a parameter which determines the sliding trajectory. We know the condition

$$\left| \frac{a_1 |x_2| + h(x)}{g(h)} \right| \leq 1, \quad (4)$$

which provides attraction to the sliding trajectory [21].

Fig. 1 shows the cases when the sliding trajectory parameter satisfies the attraction condition (4) when the trajectory of the object in the phase plane is reached again [5, 11, 12].

Such implementation of the controller with variable structure corresponds to the optimal regulation of the object of the second order (1), based on the assumption that the second intersection of the sliding trajectory is provided at the small field near by equilibrium of the system [3, 6, 7, 16]. It should be noted that in conditions of noise

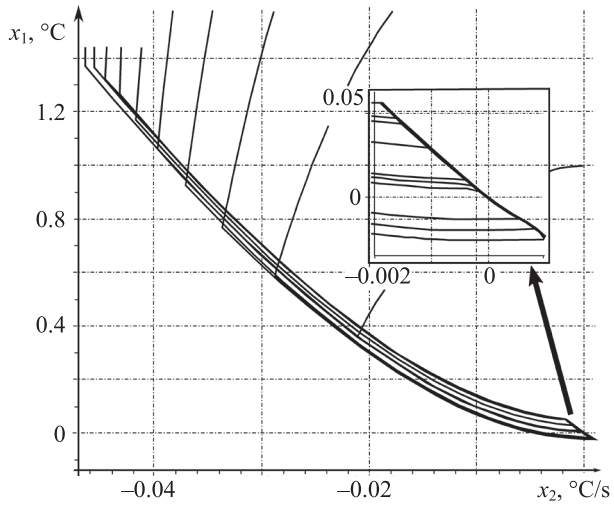



*Fig. 1*. Time optimal trajectories for management with the fragment of sliding mode

and discretization errors in the measuring channel, the implementation of the sliding mode becomes virtually impossible. This fact is proved by lack of relevant functional and program blocks in the PLC libraries.

At the same time there are known theoretical approaches allowing to perform differentiation on the relay element with integrating feedback without strict requirements for measurement quality [18]. Software implementation of the relay element with feedback makes good preconditions for implementation of sliding modes in control systems implemented on PLC base. This direction of research has significant resource of development [4].

### Synthesis of the relay element feedback

Let us bring an additional state variable $x_3(t)$ physically connected with variables $x_1(t)$ and $x_2(t)$ through the control $u$ into the mathematical model (2) of the object of the second order. Further, to calculate the control instead of (3) we will use equations

$$\begin{cases} \dot{x}_3 = \begin{cases} -a_3 x_3, \text{ if}(u = 0), \\ -k_3 u, \text{ if}(u \neq 0), \end{cases} \\ u = \eta((x_3 - x_1), \delta), \end{cases} \tag{5}$$

where the signature function is implemented by the function η(…) of the relay element with hysteresis zone δ.

### About the existence of sliding mode

**Assertion.** For a closed system (1) and (4) the existence of sliding trajectory in the form

$$s = a_s(t, x(t_0))x_1 + x_2 = 0 \tag{6}$$

is possible, where $a_s(t, x(t_0)) > 0$, $\forall t \in (t \geq t_0)$ if necessary conditions are met

$$\begin{aligned} x_1(t_0) &= x_3(t_0), \\ a_3 &\geq a_s(t). \end{aligned} \tag{7}$$

**The Proof.** Suppose that δ > σ, where σ is an infinitely small positive number, not equal to zero. Let us introduce a function

$$q(t) = \frac{T_{(u\neq 0)}}{T_{(u\neq 0)} + T_{(u=0)}}$$

which is a duty factor of active control at given time intervals corresponding to one period of self-oscillation caused by the availability of hysteresis with σ value. The limit of this function converges to the finite number $r$

$$\lim_{\delta\to\sigma} q(t) \to r,$$

which takes values in the range [0, 1] and can be regarded as equivalent control [9]. Then the closed system model for $x_1(t_0) > 0$ can be written in the form of differential equations:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 = -a_s(t)x_1, \\ \dot{x}_2 = -hx_2 - gq(t), \\ \dot{x}_3 = -a_3(1 - q(t))x_1 + k_3 q(t). \end{cases} \tag{8}$$

The differential equations (8) at given initial values of the phase variables $x_1(t_0) = C_1$, $x_2(t_0) = a_s(t_0)c_2$ have the only solution relative to the functions $a_s(t)x_1$, $q(t)$ relying on the assumption that the function $q(t)$ is equivalent control (4) providing fulfillment of the sliding mode condition $|x_1 - x_3| < \sigma$. Consequently if we have infinitesimal σ and equality $x_1 = x_3$ from the equation $a_s(t)x_1 = a_3(1 - q(t))x_1 - k_3 q(t)$, we can obtain the condition:

$$q(t) = \frac{a_3 - a_s(t)}{a_3 + k_3 x_1^{-1}} \leq 1,$$

where the solution relative to $x_1(t)$ has positive value along the whole sliding trajectory. Similarly, for the condition $(x_1(t_0) < 0)$ the differential equations of the closed system can be written in the form:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 = -a_s(t)x_1, \\ \dot{x}_2 = -hx_2 + gq(t), \\ \dot{x}_3 = -a_3(1 - q(t))x_1 - k_3 q(t). \end{cases} \tag{9}$$

The solution of the system of differential equations (9) allows us to write

$$q(t) = \frac{a_3 - a_s(t)}{a_3 - k_3 x_1^{-1}} \leq 1,$$

where the state variable $x_1(t)$ has negative values along the whole sliding trajectory. Thus, for the variants under study, we can write the following equation:

$$q(t) = \frac{a_3 - a_s(t)}{a_3 + k_3 |x_1^{-1}|} \leq 1.$$

Therefore the fulfillment of the condition (7) assumes positively defined values $q(t)$ in the range [0, 1]. Note that the choice of the value $a_3$ is determined by the conditions of the classical sliding mode existence [9], and the assertion

(7) testifies that the sliding mode (4) in the system (2) and (5) will be indirectly determined by the parameters of the object.

The conditions (6) and (7) are preceded by the initial phase of transient process in which the object trajectory is oriented towards the sliding trajectory [22]. The parameter $k_3$, which can be chosen so that condition (6) is not satisfied at the moment of the first exit to trajectory (7), has a significant effect on the nature of the exit to the sliding trajectory. Thus, the definition of the problem of this parameter selection can be done with the objective of time optimal control on base of the classical mode of sliding control (Fig. 1).

### The properties of time optimal control

Let us consider the following statement which allows us to suggest available optimal properties of the relay control under study.

**Assertion.** For an object of type (1) accounting stationarity of the functions $g$, $h$ and known initial state $\{x_1(t_0) = C_1 \in (C_{\min}, C_{\max}); x_2 = 0\}$, it is possible to organize time optimal control [17] corresponding to Pontryagin's principle of maximum in variations of the parameter $k_3$ during transient process.

The proof is based on the assertion about the number of switches of control effect for a sustained second-order object; in accordance with it optimal control with two different-polar impacts is provided. Let us show the solution of closed system of object control (1) and controller (2) in the form of transients in Fig. 2, *a*. According to the software-based negative feedback of the relay element the trajectory of the variable $x_3(t)$ (blue line) always trends to the trajectory of the variable $x_1$.

The rate of change of the variable $x_3$ is defined by the function $k_3(x, u)$ providing the intersection of the variables $x_1$ and $x_3$ at the point of switching of time optimal control. In particular, for a given initial state ($x_1 = 1$, $x_2 = 0$) of the control object, the function $k_3(x, u)$ equals to the absolute value of tangents of the angles between the phase trajectory $x_3$ and the time axis for two cases defined by the product sign of $x_1$ and $u - sign(x_1, u)$. Obviously the problem is solved for any initial position ($x_1 = x_1(t_0)$, $x_2 = 0$), and the algorithm to determine the position of control object phase state is very simple: it is a moment when the variable $x_1$ reaches maximum deviation from the equilibrium point.

By results of the analysis of the processes for time optimal control organization we propose a method to build the sliding trajectory parameter. Let us write the control (2) taking into account dependence of the configurable parameter $k_3$ on the initial state and sign

$$\begin{cases} u = \eta(x_3 - x_1, \delta), \\ \dot{x}_3 = \begin{cases} -a_3 x_3 & \text{if}(u = 0), \\ -u/T_{p1}(C_1) & \text{if}(sign(x_1 u) > 0), \\ -u/T_{p2}(C_1) & \text{if}(sign(x_1 u) > 0), \end{cases} \end{cases} \quad (10)$$

where the dependences $T_{p1}(C_1)$ and $T_{p2}(C_1)$ are determined for different initial states from the given set $C_1 \in (C_{\min}, C_{\max})$. The algorithm to determine dependences can be represented in several stages:

1) For a given control object there are defined boundary values $g = g_{\min}$ and $h = h_{\min}$ and for them optimal control is synthesized.
2) The value $C_1$ is calculated by solving the differential equations (1) at the reverse time at given duration of the second pulse of control signal switched by Fel'dbaum's method which does not require large computational resources. The example of such solutions is a family of transient processes $x_1(t)$, $x_3(t)$ for $C_1 \in$ (1,0; 0,8; 0,6; 0,4; 0,2) shown in Fig. 2, *b*.
3) On the base of the obtained transients we determine the values $T_{p1}(C_1)$ and $T_{p2}(C_1)$ for which there is a point of control switching.

The algorithm of implementation includes implementation of feedback and control in accordance with (10), the relay element and the algorithm of the control parameters recalculation in the beginning of transient process in accordance with Fig. 2, *b*. This implementation cannot be classified in the framework of existing conventional PID or linear–quadratic regulator (LQR) methods because there are program solutions along with differential solutions and complicated relay element in the algorithm. Also the considered algorithm cannot be defined as a controller with variable structure since the calculations are performed not in the phase plane. Note that the trajectories of the variables $x_1(t)$ and $x_3(t)$ on the time plane (Fig. 2, *a*) resemble the Greek letter `lambda` – λ. For this reason, within the framework of this article, the proposed method will be called the λ-regulator.

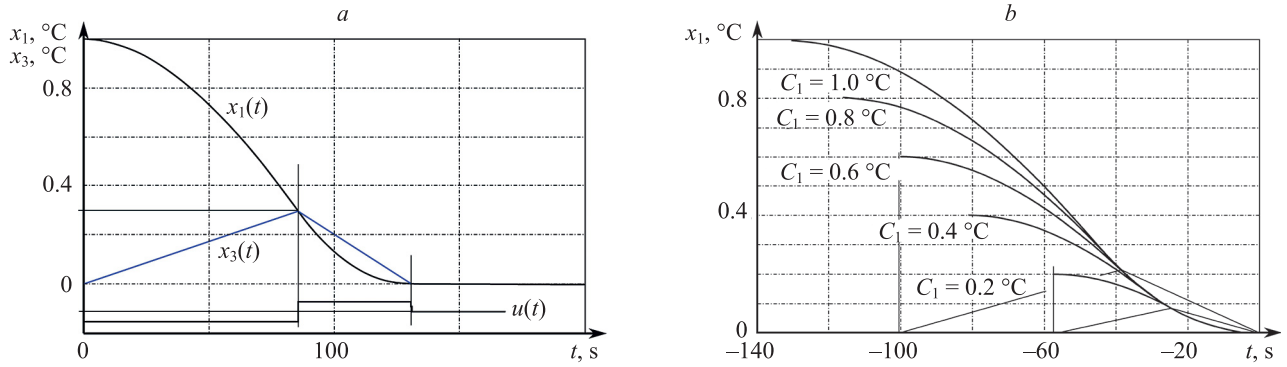



*Fig. 2*. Time optimal transient process (*a*); the family of transient processes (*b*)

### Examination and comparison of λ-regulator as an alternative for PID-regulator

For comparison we select LQR-controller [19] where at the modeling stage we assume the following: all the state variables of the linearized system [23] are available for measurement, that's why no need to use the linear system state observer. Control values for LQR-regulator as opposed to relay control can include the whole set of values in the range [–1, +1]. In solution of Riccati equation, the weighting matrix **Q** is a single diagonal, and the weighting matrix **R** contains the only element whose value is chosen under the condition of control value limitation. The simulated results of the linearized system with LQR and λ-regulator are shown in Fig. 3.

Fig. 3, *a* shows transients of target variables $T_{to3}$ and $T_{bk1}$ and control $u$ by solid lines for λ-regulator and by dotted lines for LQR-regulator.

The operating mode of a closed system is interesting to study when change of derivative from the target variable takes place because of number of reasons and external influences. Fig. 3, *b* demonstrates the simulated results allowing us to compare effectiveness of closed system operation. From the two figures we can see the advantages of time controller operation.

The operation of λ-regulator algorithm is compared with the operation of LQR-regulator which in consideration of the object astatism implements PI control law. For tradeoff with three-position control, pulse-width modulation is used. The result of the research of λ-regulator advantage can be observed in Fig. 4, *a* where two pulses of impact are clearly evinced in the beginning of the transient process.

To underscore the robust properties of the relay controller, two different heat-consumption objects were chosen: a large dwelling house and a garage box. The results of the research demonstrate that under change of operating time of drive stroke from 18 to 180 s and time of object inertia from 12 to 120 s the controller with fixed settings provides for both objects sliding mode with the trajectory time constant equal approximately 300 s (Fig. 4, *b*). Available range of change of drive stroke operating time and time of the object inertia allows us to cover almost the whole set of possible parameters of heat-consumption objects.

Relying on statistics of display of the relay controller robust properties in more than 500 technically operable heat units of heat-consumption circuits, there were ascertained typical controller settings: $T_{p1}$ = 30 s, $T_{p2}$ = 20 s, $T_{ob}$ = 300 s.

It is advisable to separately consider the modes of active change in the flow of hot water in the heating system which leads to a characteristic perturbation of the observed temperature. Fig. 5 shows transients for these modes and almost even initial conditions of the heating system functioning with two types of λ-regulator and PID-regulator.

The comparative evaluation of the system target variable fluctuations allows us to conclude the advantage of the relay λ-regulator.

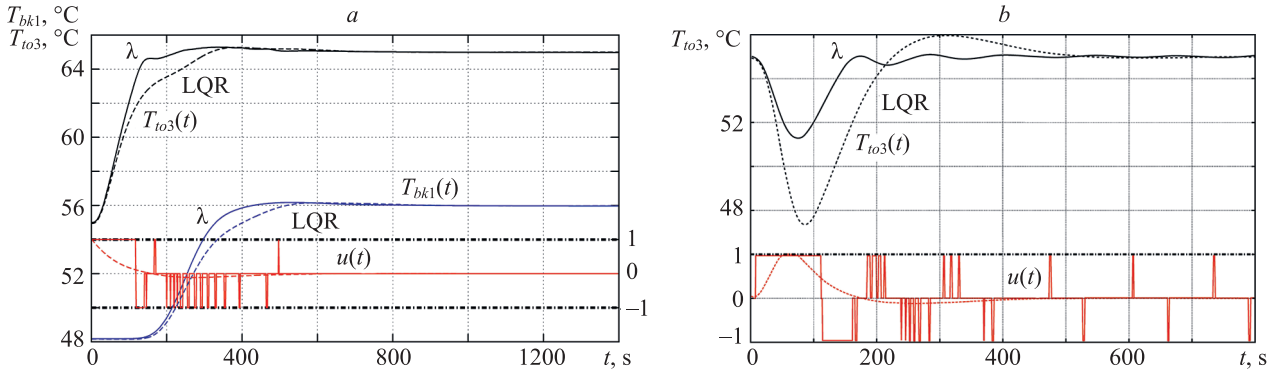



*Fig. 3*. Simulated results of transients of heat-consumption system with LQR and λ-regulators (*a*); the simulated result of operation under the change of the target variable derivative (*b*)

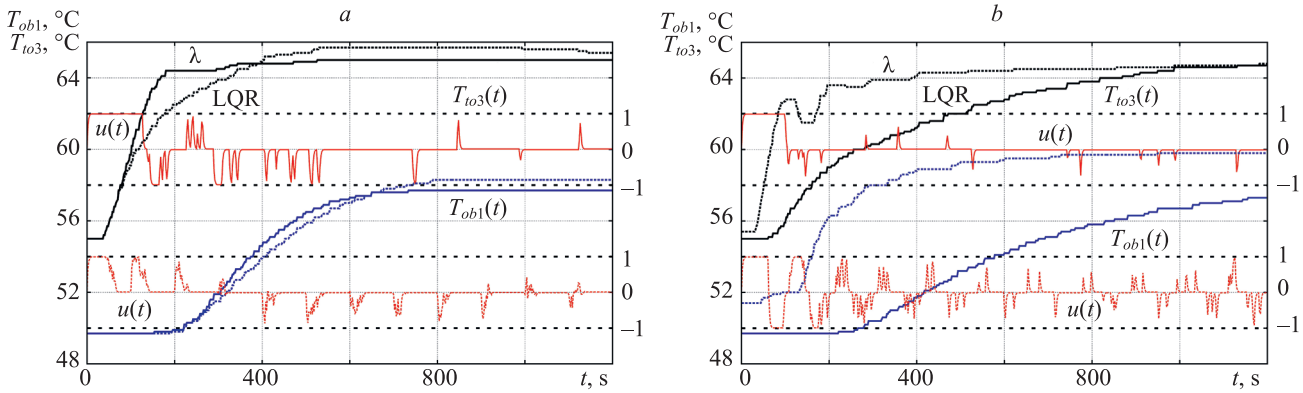



*Fig. 4*. Optimal control with relay and PI controllers (*a*); the robust properties of the relay λ-regulators (*b*)

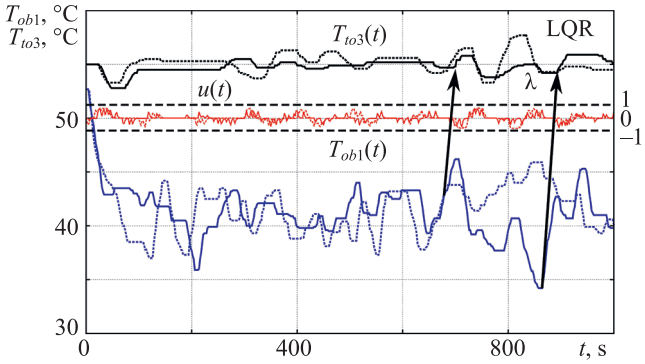



*Fig. 5*. Transients in active phase

The proposed λ-controller is a good alternative for replacing the PID controller with PWM in inertial-astatic systems, such as control of ventilation and heat consumption systems [24, 25]. This fact is confirmed by the successful operation of the λ-controller in the FBD of PLC units during 8 years.

## Conclusion

The conducted studies show that the λ-regulator has an advantage in speed when controlling dynamic objects, in particular, for a deterministic second-order object with astaticism. The synthesis of λ-regulator is based on the principles of implementation of sliding modes having properties of time optimal control. At the same time, this regulator has robust sliding mode control properties for closed systems with interval parameters.

The obtained controller algorithm, implemented on a PLC, has been successfully used for several years at more than 100 heat supply facilities with three-position control. Experts in the field of control and automation can easily use the proposed algorithm for objects presented in the form of a mathematical model (1), without the need to calculate the derivative of the measured signal.

It is important to note that the proposed method cannot be offered as an unambiguous alternative to sliding control since the method of constructing a λ-controller and its software implementation have some peculiarities.

1. In particular, the properties of robust control are theoretically not strictly defined and not proven, as was done in relation to sliding control.
2. The $a_s$ parameter (6) depends on the mismatch amplitude and decreases as the equilibrium point is approached. Thus, the question of the possibility of asymptotic stability with a constant parameter $a_s$ remains unresolved in the theoretical presentation.
3. The software implementation algorithm is somewhat more complicated than simply calculating the sign of the control. It is obvious that the methods of adjusting the slip parameter to achieve the robust properties of the controller will lead to the complication of the algorithm.

A distinctive feature of the controller under consideration is the property of optimal control at high rates of change in processes in objects and with a large control error for objects represented by differential equations of the second and, possibly, third order.

The issue of the complexity in the control algorithm is not a significant obstacle for modern developed controllers. The presented drawbacks can be considered as open scientific tasks. These tasks can be useful and interesting to specialists in the field of mathematical analysis of nonlinear systems as an open challenge for further theoretical analysis.

## References


1. Poznyak A.S. Sliding mode control in stochastic continuos-time systems: μ-zone MS-convergence. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2017, vol. 62, no. 2, pp. 863–868. https://doi.org/10.1109/TAC.2016.2557759
2. Alibeji N., Sharma N. A PID-type robust input delay compensation method for uncertain Euler-Lagrange systems. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2017, vol. 25, no. 6, pp. 2235–2242. https://doi.org/10.1109/TCST.2016.2634503
3. Guo X., Ren H.P. Robust variable structure control for three-phase PWM converter. *Zidonghua Xuebao/Acta Automatica Sinica*, 2015, vol. 41, no. 3, pp. 601–610. (in Chinese). https://doi.org/10.16383/j.aas.2015.c140421
4. Zhu Q.D., Wang T. An improved design scheme of variable structure control for discrete-time systems. *Zidonghua Xuebao/Acta Automatica Sinica*, 2010, vol. 6, no. 6, pp. 885–889. (in Chinese). https://doi.org/10.3724/SP.J.1004.2010.00885
5. Parra-Vega V., Fierro-Rojas J.D. Sliding PID uncalibrated visual servoing for finite-time tracking of planar robots. *Proc. of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.03CH37422)*, 2003, vol. 3, pp. 3042–3047. https://doi.org/10.1109/ROBOT.2003.1242058
6. Choi H.H. LMI-based sliding surface design for integral sliding mode control of mismatched uncertain systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2007, vol. 52, no. 4, pp. 736–742. https://doi.org/10.1109/TAC.2007.894543
7. Huang Y. J., Kuo T.C., Chang S.H. Adaptive sliding-mode control for nonlinear systems with uncertain parameters. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, 2008, vol. 38, no. 2, pp. 534–539. https://doi.org/10.1109/TSMCB.2007.910740


## Литература


1. Poznyak A.S. Sliding mode control in stochastic continuos-time systems: μ-zone MS-convergence // IEEE Transactions on Automatic Control. 2017. V. 62. N 2. P. 863–868. https://doi.org/10.1109/TAC.2016.2557759
2. Alibeji N., Sharma N. A PID-type robust input delay compensation method for uncertain Euler-Lagrange systems // IEEE Transactions on Control Systems Technology. 2017. V. 25. N 6. P. 2235–2242. https://doi.org/10.1109/TCST.2016.2634503
3. Guo X., Ren H.P. Robust variable structure control for three-phase PWM converter // Zidonghua Xuebao/Acta Automatica Sinica. 2015. V. 41. N 3. P. 601–610. (in Chinese). https://doi.org/10.16383/j.aas.2015.c140421
4. Zhu Q.D., Wang T. An improved design scheme of variable structure control for discrete-time systems // Zidonghua Xuebao/Acta Automatica Sinica. 2010. V. 36. N 6. P. 885–889. (in Chinese). https://doi.org/10.3724/SP.J.1004.2010.00885
5. Parra-Vega V., Fierro-Rojas J.D. Sliding PID uncalibrated visual servoing for finite-time tracking of planar robots // Proc. of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.03CH37422). 2003. V. 3. P. 3042–3047. https://doi.org/10.1109/ROBOT.2003.1242058
6. Choi H.H. LMI-based sliding surface design for integral sliding mode control of mismatched uncertain systems // IEEE Transactions on Automatic Control. 2007. V. 52. N 4. P. 736–742. https://doi.org/10.1109/TAC.2007.894543
7. Huang Y.J., Kuo T.C., Chang S.H. Adaptive sliding-mode control for nonlinear systems with uncertain parameters // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics. 2008. V. 38. N 2. P. 534–539. https://doi.org/10.1109/TSMCB.2007.910740

8. Abdulgalil F., Siguerdidjane H. PID based on sliding mode control for rotary drilling system. *Proc. of the EUROCON 2005 — The International Conference on "Computer as a Tool"*, 2005, vol. 1, pp. 262–265. https://doi.org/10.1109/EURCON.2005.1629911
9. Utkin V. I. *Sliding Modes in Control and Optimization*. Berlin, Germany, Springer, 1992, 299 p.
10. Li X.B., Ma L., Ding S.H. A new second-order sliding mode control and its application to inverted pendulum. *Zidonghua Xuebao/Acta Automatica Sinica*, 2015, vol. 41, no. 1, pp. 193–202. (in Chinese). https://doi.org/10.16383/j.aas.2015.c140263
11. Li Y., Xu Q. Adaptive sliding mode control with perturbation estimation and PID sliding surface for motion tracking of a piezo-driven micromanipulator. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2010, vol. 18, no. 4, pp. 798–810. https://doi.org/10.1109/TCST.2009.2028878
12. Mu C.X., Yu X.H., Sun C.Y. Phase trajectory and transient analysis for nonsingular terminal sliding mode control systems. *Zidonghua Xuebao/Acta Automatica Sinica*, 2013, vol. 39, no. 6, pp. 902–908. (in Chinese). https://doi.org/10.3724/SP.J.1004.2013.00902
13. Bartolini G., Pydynowski P. An improved, chattering free, V.S.C. scheme for uncertain dynamical systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1996, vol. 41, no. 8, pp. 1220–1226. https://doi.org/10.1109/9.533691
14. Bartolini G., Ferrara A., Usai E. Chattering avoidance by second-order sliding mode control. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1998, vol. 43, no. 2, pp. 241–246. https://doi.org/10.1109/9.661074
15. Bartolini G., Ferrara A., Usai E., Utkin V.I. On multi-input chattering-free second-order sliding mode control. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2000, vol. 45, no. 9, pp. 1711–1717. https://doi.org/10.1109/9.880629
16. Zhang Y., Ma G.F., Guo Y.N., Zeng T.Y. A multi power reaching law of sliding mode control design and analysis. *Zidonghua Xuebao/Acta Automatica Sinica*, 2016, vol. 42, no. 3, pp. 466–472. (in Chinese). https://doi.org/10.16383/j.aas.2016.c150377
17. Kim N., Cha S., Peng H. Optimal control of hybrid electric vehicles based on Pontryagin's minimum principle. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2011, vol. 19, no. 5, pp. 1279–1287. https://doi.org/10.1109/TCST.2010.2061232
18. Klyuev A.S., Kolesnikov A.A. *Optimization of Automatic Control Systems by Speed*. Moscow, Energoizdat, 1982, 239 p. (in Russian)
19. Kirk D.D. *Optimal Control Theory*. An Introduction. Englewood Cliffs, NJ, Prentice-Hall, 1970, 472 p.
20. Li Y., Wang Z., Zhu L. Adaptive neural network PID sliding mode dynamic control of nonholonomic mobile robot. *Proc. of the IEEE International Conference on Information and Automation*, 2010, pp. 753–757. https://doi.org/10.1109/ICINFA.2010.5512467
21. Khalil H.K. *Nonlinear Systems*. 3nd ed., Upper Saddle River, NJ, Prentice Hall, 2002, 750 p.
22. Liu T., Liu H.P. Quasi-sliding-mode control based on discrete reaching law with dead zone. *Zidonghua Xuebao/Acta Automatica Sinica*, 2011, vol. 37, no. 6, pp. 760–766. (in Chinese). https://doi.org/10.3724/SP.J.1004.2011.00760
23. Shilin A.A., Bukreev V.G. The reduction of the multidimensional model of the nonlinear heat exchange system with delay. *Communications in Computer and Information Science*, 2014, vol. 487, pp. 387–396. https://doi.org/10.1007/978-3-319-13671-4_44
24. Shilin A.A., Bukreev V.G., Prohorov S. Pressure pump power control in the primary circuit of the heat exchange system. *MATEC Web of Conferences*, 2016, vol. 91, pp. 01043. https://doi.org/10.1051/matecconf/20179101043.
25. Savrasov F.V., Prokhorov S.V., Shilin A.A. The computer simulation of hoar-frost's clearing process in the air recuperation system. *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, vol. 803, no. 1, pp. 012134. https://doi.org/10.1088/1742-6596/803/1/012134

8. Abdulgalil F., Siguerdidjane H. PID based on sliding mode control for rotary drilling system // Proc. of the EUROCON 2005 - The International Conference on "Computer as a Tool". 2005. V. 1. P. 262–265. https://doi.org/10.1109/EURCON.2005.1629911
9. Utkin V.I. Sliding Modes in Control and Optimization. Berlin, Germany: Springer, 1992. 299 p.
10. Li X.B., Ma L., Ding S.H. A new second-order sliding mode control and its application to inverted pendulum // Zidonghua Xuebao/Acta Automatica Sinica. 2015. V. 41. N 1. P. 193–202. (in Chinese). https://doi.org/10.16383/j.aas.2015.c140263
11. Li Y., Xu Q. Adaptive sliding mode control with perturbation estimation and PID sliding surface for motion tracking of a piezo-driven micromanipulator // IEEE Transactions on Control Systems Technology. 2010. V. 18. N 4. P. 798–810. https://doi.org/10.1109/TCST.2009.2028878
12. Mu C.X., Yu X.H., Sun C.Y. Phase trajectory and transient analysis for nonsingular terminal sliding mode control systems // Zidonghua Xuebao/Acta Automatica Sinica. 2013. V. 39. N 6. P. 902–908. (in Chinese). https://doi.org/10.3724/SP.J.1004.2013.00902
13. Bartolini G., Pydynowski P. An improved, chattering free, V.S.C. scheme for uncertain dynamical systems // IEEE Transactions on Automatic Control. 1996. V. 41. N 8. P. 1220–1226. https://doi.org/10.1109/9.533691
14. Bartolini G., Ferrara A., Usai E. Chattering avoidance by second-order sliding mode control // IEEE Transactions on Automatic Control. 1998. V. 43. N 2. P. 241–246. https://doi.org/10.1109/9.661074
15. Bartolini G., Ferrara A., Usai E., Utkin V.I. On multi-input chattering-free second-order sliding mode control // IEEE Transactions on Automatic Control. 2000. V. 45. N 9. P. 1711–1717. https://doi.org/10.1109/9.880629
16. Zhang Y., Ma G.F., Guo Y.N., Zeng T.Y. A multi power reaching law of sliding mode control design and analysis // Zidonghua Xuebao/Acta Automatica Sinica. 2016. V. 42. N 3. P. 466–472. (in Chinese). https://doi.org/10.16383/j.aas.2016.c150377
17. Kim N., Cha S., Peng H. Optimal control of hybrid electric vehicles based on Pontryagin's minimum principle // IEEE Transactions on Control Systems Technology. 2011. V. 19. N 5. P. 1279–1287. https://doi.org/10.1109/TCST.2010.2061232
18. Клюев А.С., Колесников А.А. Оптимизация автоматических систем управления по быстродействию. М.: Энергоиздат, 1982. 239 с.
19. Kirk D.D. Optimal Control Theory. An Introduction. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1970. 472 p.
20. Li Y., Wang Z., Zhu L. Adaptive neural network PID sliding mode dynamic control of nonholonomic mobile robot // Proc. of the IEEE International Conference on Information and Automation. 2010. P. 753–757. https://doi.org/10.1109/ICINFA.2010.5512467
21. Khalil H.K. Nonlinear Systems. 3nd ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2002. 750 p.
22. Liu T., Liu H.P. Quasi-sliding-mode control based on discrete reaching law with dead zone // Zidonghua Xuebao/Acta Automatica Sinica. 2011. V. 37. N 6. P. 760–766. (in Chinese). https://doi.org/10.3724/SP.J.1004.2011.00760
23. Shilin A.A., Bukreev V.G. The reduction of the multidimensional model of the nonlinear heat exchange system with delay // Communications in Computer and Information Science. 2014. V. 487. P. 387–396. https://doi.org/10.1007/978-3-319-13671-4_44
24. Shilin A.A., Bukreev V.G., Prohorov S. Pressure pump power control in the primary circuit of the heat exchange system // MATEC Web of Conferences. 2016. V. 91. P. 01043. https://doi.org/10.1051/matecconf/20179101043
25. Savrasov F.V., Prokhorov S.V., Shilin A.A. The computer simulation of hoarfrost's clearing process in the air recuperation system // Journal of Physics: Conference Series. 2017. V. 803. N 1. P. 012134. https://doi.org/10.1088/1742-6596/803/1/012134


## Authors

**Aleksandr A. Shilin** — D. Sc. (Eng.), Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, 643050, Russian Federation; Software Engineer, LLC "NPO VEST", 634009, Tomsk, 634009, Russian Federation, SC 56330899200, https://orcid.org/0000-0002-4761-7249, shilin@tpu.ru

## Авторы

**Шилин Александр Анатольевич** — доктор технических наук, профессор, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, 634050, Российская Федерация; инженер-программист, ООО «НПО ВЭСТ», Томск, 634009, Российская Федерация, SC 56330899200, https://orcid.org/0000-0002-4761-7249, shilin@tpu.ru

**Viktor G. Bukreev** — D. Sc., Full Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, 643050, Russian Federation, SC 7005611043, https://orcid.org/0000-0001-9861-9765, bukreev@tpu.ru

**Filipp V. Perevoshchikov** — Student, National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, 643050, Russian Federation, SC 57216875510, https://orcid.org/0000-0002-7932-2744, fvp2@tpu.ru

**Букреев Виктор Григорьевич** — доктор технических наук, профессор, профессор, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, 634050, Российская Федерация, SC 7005611043, https://orcid.org/0000-0001-9861-9765, bukreev@tpu.ru

**Перевощиков Филипп Владимирович** — студент, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, 634050, Российская Федерация, SC 57216875510, https://orcid.org/0000-0002-7932-2744, fvp2@tpu.ru

*Received 22.02.2022*
*Approved after reviewing 01.05.2022*
*Accepted 29.05.2022*

*Статья поступила в редакцию 22.02.2022*
*Одобрена после рецензирования 01.05.2022*
*Принята к печати 29.05.2022*

Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ
май–июнь 2022 Том 22 № 3 http://ntv.ifmo.ru/
SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL OF INFORMATION TECHNOLOGIES, MECHANICS AND OPTICS
May–June 2022 Vol. 22 No 3 http://ntv.ifmo.ru/en/
ISSN 2226-1494 (print) ISSN 2500-0373 (online)

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК УНИВЕРСИТЕТ ИТМО
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ

## НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ И НАНОТЕХНОЛОГИИ
## MATERIAL SCIENCE AND NANOTECHNOLOGIES

doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-3-509-516
УДК 535.342

# Фотокаталитические свойства наноструктур Ag–AgBr в ионообменном слое натриево-цинк-алюмосиликатного стекла с бромом

**Дмитрий Вячеславович Марасанов[1]✉, Евгений Михайлович Сгибнев[2], Николай Валентинович Никоноров[3]**

[1,2,3] Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

[1] Dmitriymarasanov@bk.ru✉, https://orcid.org/0000-0001-8480-2016
[2] sgibnevem@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-2840-9479
[3] nikonorov@oi.ifmo.ru, https://orcid.org/0000-0002-1341-067X

**Аннотация**

**Предмет исследования.** Исследованы фотокаталитические свойства наноструктур Ag–AgBr, сформированных методом низкотемпературного ионного обмена с последующей термообработкой в натриево-цинк-алюмосиликатном стекле с бромом. **Метод.** Синтезировано стекло на основе матрицы $Na_2O$–$ZnO$–$Al_2O_3$–$SiO_2$, легированной оксидами сурьмы $Sb_2O_3$, церия $CeO_2$ и бромом. Методом ионного обмена на поверхности натриево-цинк-алюмосиликатного стекла сформирован слой, содержащий ионы серебра. Образцы были погружены в смесь нитратов $5AgNO_3/95NaNO_3$ (мол.%) при температуре 320 °C в течение двух часов. Последующая термообработка при 500 °C привела к формированию наноструктур Ag–AgBr в поверхностном слое. Фотокаталитические свойства Ag–AgBr наноструктур на поверхности стекла измерены по деградации метилового оранжевого красителя. **Основные результаты.** Проведено комплексное исследование спектральных и фотокаталитических свойств Ag–AgBr наноструктур. Показано, что после ионного обмена и термообработки сформировалась кристаллическая оболочка AgBr размером 6 нм на наночастицах серебра. Установлено, что наличие фотокатализатора с наноструктурами Ag–AgBr в поверхностном слое стекла в процессе ультрафиолетового облучения привело к деградации метилового оранжевого красителя на 77 %. Уменьшение толщины ионообменного слоя до 5 мкм посредством химического травления уменьшило эффективность деградации метилового оранжевого красителя до 15 %. **Практическая значимость.** Результаты работы могут быть применимы в устройствах для фотокаталитического разложения воды при получении водорода.

**Ключевые слова**

ионный обмен, бромидное натриево-цинк-алюмосиликатное стекло, наночастицы серебра, AgBr нанокристаллы, фотокатализ, метиловый оранжевый краситель

**Благодарности**

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда (проект № 20-19-00559.)
Авторы благодарят инженера Университета ИТМО Н.К. Кузьменко за проведение рентгенофазового анализа.

**Ссылка для цитирования:** Марасанов Д.В., Сгибнев Е.М., Никоноров Н.В. Фотокаталитические свойства наноструктур Ag–AgBr в ионообменном слое натриево-цинк-алюмосиликатного стекла с бромом // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2022. Т. 22, № 3. С. 509–516. doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-3-509-516

# Photocatalytic properties of Ag–AgBr nanostructures in ion-exchanged layers of bromide sodium-zinc-aluminosilicate glass matrix

**Dmitriy V. Marasanov[1]✉, Yevgeniy M. Sgibnev[2], Nikolay V. Nikonorov[3]**

[1,2,3] ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

[1] Dmitriymarasanov@bk.ru✉, https://orcid.org/0000-0001-8480-2016
[2] sgibnevem@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-2840-9479
[3] nikonorov@oi.ifmo.ru, https://orcid.org/0000-0002-1341-067X

© Марасанов Д.В., Сгибнев Е.М., Никоноров Н.В., 2022

**Abstract**

The photocatalytic properties of Ag–AgBr nanostructures formed by low-temperature ion exchange method and followed heat-treatment in bromide sodium-zinc-aluminosilicate glass have been investigated. Glasses based on $Na_2O$–$ZnO$–$Al_2O_3$–$SiO_2$ system and doped with $Sb_2O_3$, $Ce_2O_3$ and Br were synthesized. Layers containing silver ions were formed on the surface of sodium-zinc-aluminosilicate glass by the ion exchange method. The glass samples were immersed in a bath containing a melt of nitrate mixture $5AgNO_3/95NaNO_3$ (mol%) at 320 °C for 2 hours. Subsequent heat treatment at 500 °C resulted in a formation of Ag–AgBr nanostructures in the surface layer. The photocatalytic properties of the Ag–AgBr nanostructures on the glass surface were measured by the decomposition of the methyl orange dye. A comprehensive study of the spectral and photocatalytic properties of Ag–AgBr nanostructures has been carried out. It was shown that, after ion exchange and heat treatment, the AgBr crystal shells with a size of 6 nm were formed around silver nanoparticles. It has been established that the presence of a photocatalyst with Ag–AgBr nanostructures in the surface layer of glass under ultraviolet irradiation leads to degradation of the methyl orange dye by 77 %. Reducing the thickness of the ion-exchange layer to 5 μm by chemical etching decreased the degradation efficiency of the methyl orange dye to 15 %. The results of the work can be applied in devices for the photocatalytic decomposition of water to produce hydrogen.

**Keywords**

ion exchange, bromide sodium-zinc-aluminosilicate glass, silver nanoparticles, AgBr nanocrystals, photocatalysis, methyl orange dye

**Aknowledgements**

The work was supported by the Russian Science Foundation (project no. 20-19-00559).
The authors thank engineer Kuzmenko N.K. in ITMO University for X-ray phase analysis.

**For citation:** Marasanov D.V., Sgibnev Y.M., Nikonorov N.V. Photocatalytic properties of Ag–AgBr nanostructures in ion-exchanged layers of bromide sodium-zinc-aluminosilicate glass matrix. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2022, vol. 22, no. 3, pp. 509–516. (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-3-509-516

## Введение

В настоящее время человечество все еще использует для получения энергии горючие природные ископаемые. Но их запасы с каждым годом уменьшаются и со временем будут истощены. По этой причине ученые активно ведут поиск альтернативных источников энергии. При этом важно использовать экологически чистые источники энергии, например водород. Разложение воды под действием ультрафиолетового (УФ) и видимого солнечных излучений на водород и кислород — приоритетное направление в солнечной энергетике. При фотокаталитической реакции разложения воды не образуется побочных веществ, кроме кислорода и водорода, что позволяет относить такую технологию к «зеленой» энергетике [1].

Большое число научных работ посвящено изучению фотокаталитической эффективности различных соединений переходных металлов ($ZrO_2$, ZnS, ZnO, $WO_3$, $TiO_2$, AgCl, AgBr, $CuBr_2$ и др.) [2–5]. Устройства для разложения воды используются в качестве катодов соединения переходных металлов. Наночастицы серебра обладают плазмонным резонансом с поглощением в видимой области спектра, что также позволяет использовать их в фотокаталитических реакциях [6]. Галогениды серебра обладают полупроводниковыми свойствами с шириной запрещенной зоны 3,25 и 2,6 эВ для AgCl и AgBr соответственно [7]. В результате для преодоления энергетического барьера в бромиде серебра требуется меньше энергии, по сравнению с хлоридом серебра. Фотокатализаторы на основе Ag–AgBr и Ag–AgCl показали высокую фотокаталитическую эффективность [8–11], при деградации различных красителей в присутствии Ag–AgBr/Ag–AgCl более 90 %. Процесс фотокаталитической реакции в присутствии полупроводника связан с образованием под действием света электронно-дырочных пар. Сформированные таким методом электронно-дырочные пары могут реагировать как с молекулой красителя, так и с молекулой воды с последующим выделением водорода [12]. Метиловый оранжевый краситель (МОК) — один из наиболее широко используемых модельных объектов для исследования фотокаталитических свойств различных материалов. При этом в некоторых научных работах отмечено, что деградация МОК под воздействием УФ излучения не происходит [13]. Например, при использовании другого популярного красителя — метиленового голубого — происходит обесцвечивание и без фотокатализатора [14], что осложняет интерпретацию экспериментальных данных. Применение данного метода дает возможность оценить фотокаталитическую эффективность по отношению к красителю и далее провести исследования с водой.

Для получения наночастиц Ag–AgBr/Ag–AgCl в стекле может использоваться матрица натриево-цинк-алюмосиликатного (НЦАС) стекла. В настоящей работе НЦАС стекло синтезируется на основе матрицы $Na_2O$–$ZnO$–$Al_2O_3$–$SiO_2$ и, как и другие силикатные стекла, характеризуется высокой механической прочностью и химической стойкостью. В матрицу НЦАС стекла возможно внедрение различных ионов, в том числе серебра и галогенов. Однако из-за низкой растворимости ионного серебра в силикатной матрице получение высоких концентраций серебра возможно только с помощью технологии низкотемпературного ионного обмена. Метод ионного обмена заключается в обмене щелочных катионов из расплава солей или другого источника ионов щелочных, или переходных металлов на ионы в стекле. Такой метод отличается простотой и эффективностью в применении. Последующая термообработка стекол, подвергнутых $Na^+$–$Ag^+$ ионного обмена, при наличии в стекле восстановителей для ионов серебра

приводит к формированию люминесцентных молекулярных кластеров серебра или наночастиц серебра в зависимости от температуры последующей термообработки [15, 16]. Восстановителем ионов серебра могут являться любые ионы переменной валентности, в том числе ионы сурьмы или церия. При этом, по аналогии с фото-термо-рефрактивным стеклом, вокруг наночастицы серебра в галогенид-содержащих стеклах формируется оболочка из галогенидов натрия и серебра AgBr/NaBr (AgCl/NaCl) [17, 18], т. е. образуются сложные структуры в виде серебряного ядра и галогенсодержащих оболочек.

Оптические свойства нанокристаллов бромида серебра без ядра из наночастиц серебра были исследованы в ионообменном слое НЦАС стекла с бромом [19]. Однако фотокаталитические свойства серебряных наноструктур с галогенидами серебра, сформированными в матрице стекла, ранее не исследовались. Цель работы — изучение фотокаталитических свойств наночастиц серебра Ag–AgBr, синтезированных в НЦАС стекле методом низкотемпературного $Na^+$–$Ag^+$ ионного обмена.

## Методология и материалы

В настоящей работе синтезировано стекло, на основе НЦАС матрицы $Na_2O$–ZnO–$Al_2O_3$–$SiO_2$, легированной оксидами сурьмы $Sb_2O_3$ и церия $CeO_2$, а также бромом (далее по тексту GAgBr). Серебро вводилось методом низкотемпературного $Na^+$–$Ag^+$ ионного обмена. Для этого образцы стекла после шлифовки и полировки погружались в смесь нитратов $AgNO_3/NaNO_3$, содержащем 5 мол.% $AgNO_3$ при температуре 320 °C в течение 2 ч. Для измерения профиля показателя преломления применена волноводная методика, измерены резонансные углы возбуждения волноводных мод с использованием стеклянных призм для ввода/вывода излучения He-Ne лазера (λ = 632,8 нм). По полученным углам определены эффективные показатели преломления волноводных мод. Профили показателя преломления ионообменных стекол рассчитаны на основе измеренных эффективных показателей преломления волноводных мод с использованием обратного метода Вентцеля–Крамерса–Бриллюэна [20].

Затем образцы стекла подвергались термообработке при температуре 500 °C в течение 3 ч. В результате в стекле GAgBr был сформирован слой с наноструктурами Ag–AgBr.

Исследование фотокаталитических свойств выполнено путем сравнения спектров поглощения водного раствора МОК (1 мг красителя на 100 мл $H_2O$) при его УФ облучении без образца и с образцом в кювете. Перед измерениями образцы выдерживались в темноте в течение 30 мин в растворе МОК для установления равновесия процессов адсорбции-десорбции красителя на поверхности образцов. В качестве источника УФ и видимого излучений (320–500 нм) использована лампа Exfo Novacure 2100. Спектры поглощения измерены с помощью спектрофотометра Lambda 650 (Perkin–Elmer). Плотность мощности излучения лампы, дошедшего до образцов, составила 80 мВт/см$^2$. Величина деградации красителя $C/C_0$ рассчитана как отношение значений оптической плотности $C$ красителя к плотности до начала облучения $C_0$ на длине волны 465 нм.

Рентгенограммы образцов получены с помощью рентгеновского дифрактометра Ultima IV (Rigaku). Расчет диаметра наноструктур по данным рентгенофазового анализа (РФА) выполнен по формуле Шеррера [21–25]:

$$d = K\lambda/(\beta\cos\theta),$$

где $K$ — постоянная Шеррера; λ — длина волны рентгеновского излучения; β — ширина пика на полувысоте; θ — угол дифракции.

Так как поверхность фотокатализатора играет важную роль в реакции, то проведено исследование влияния обработки стекла в растворе плавиковой кислоты для удаления рельефного и трещиноватого поверхностных слоев стекла толщиной до 5 мкм. Данный метод позволяет вывести наноструктуры Ag–AgBr на поверхность образца и в результате увеличить площадь взаимодействия красителя с наноструктурами.

## Результаты и обсуждение

На рис. 1 представлены спектры поглощения образцов до и после ионного обмена, после ионного обмена и термообработки, а также после химического травления для удаления слоев толщиной 2 и 5 мкм. Исходное стекло демонстрирует низкое поглощение матрицы НЦАС стекла во всем видимом диапазоне. Полоса поглощения с максимумом при 310 нм связана с поглощением ионов $Ce^{3+}$, а коротковолновое плечо

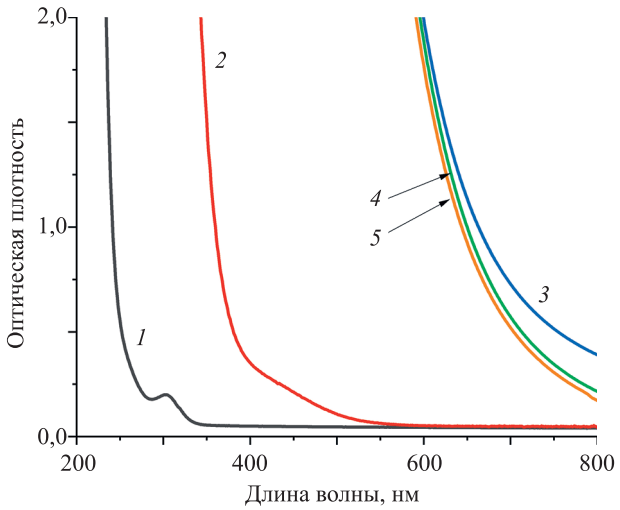



*Рис. 1*. Спектры поглощения GAgBr натриево-цинк-алюмосиликатного стекла: исходного (кривая *1*); после ионного обмена (кривая *2*); после ионного обмена и последующей термообработки (кривая *3*); после травления слоев 2 мкм (кривая *4*) и 5 мкм (кривая *5*)

*Fig. 1*. Absorption Spectra of GAgBr sodium-zinc-aluminosilicate glass: initial (curve *1*); after ion exchange (curve *2*); after ion exchange and subsequent heat treatment (curve *3*); after etching of layers 2 μm (curve *4*) and 5 μm (curve *5*)

соответствует $Ce^{4+}$ [26, 27]. После ионного обмена происходит длинноволновый сдвиг края УФ поглощения за счет внедренных в стекло ионов серебра. После ионного обмена и термообработки образец характеризуется высоким поглощением во всем видимом диапазоне, что связано с образованием наночастиц типа ядро-оболочка Ag–AgBr. После химического травления амплитуда поглощения в области 600–800 нм снижается вследствие уменьшения толщины слоя, содержащего наноструктуры Ag–AgBr. На рис. 2 представлен профиль показателя преломления стекла после ионного обмена. Замещение ионов натрия на ионы серебра приводит к увеличению показателя преломления стекла за счет более высокой поляризуемости серебра [28]. Глубина ионообменного слоя составила 47 мкм. Отметим, что эффективные показатели преломления для TE- и TM-мод совпали, что говорит об отсутствии двулучепреломления, и, как следствие, напряжений в исследуемом стекле при $Na^+$–$Ag^+$ ионного обмена. В таком случае профиль показателя преломления определяется только концентрацией ионов серебра. Формирование наночастиц в слое с градиентом концентрации серебра может приводить к изменению соотношения размеров серебряного ядра и галогенидной оболочки по глубине слоя.

Рентгенофазовый анализ стекла GAgBr (рис. 3) демонстрирует наличие полос на 26º48′, 31º, 44º24′, 55º06′, соответствующим нанокристаллам AgBr [29, 30], и полосу наночастиц серебра на 38° и 44°. По формуле Шеррера были рассчитаны усредненные размеры: кристаллов бромида серебра, значения которых составили 6 нм, и наночастиц серебра в стекле GAgBr — 2 нм.

Изображение скола (рис. 4) получено с помощью оптического микроскопа и позволяет определить толщину ионообменного слоя бромидного НЦАС стекла, которая составляет 163 мкм. Таким образом, толщина ионообменного слоя после термообработки превышает толщину слоя после ионного обмена примерно в 3 раза за счет диффузии ионов серебра вглубь стекла при термообработке.

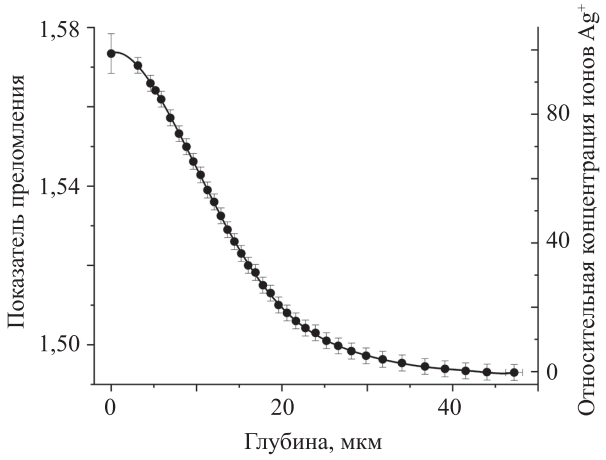



*Рис. 2*. Профиль показателя преломления стекла GAgBr после ионного обмена (5 %$AgNO_3$/95 % $NaNO_3$ в течение 2 ч)

*Fig. 2*. Refractive index profile of GAgBr glass after ion exchange (5 %$AgNO_3$/95 % $NaNO_3$, 2 h)

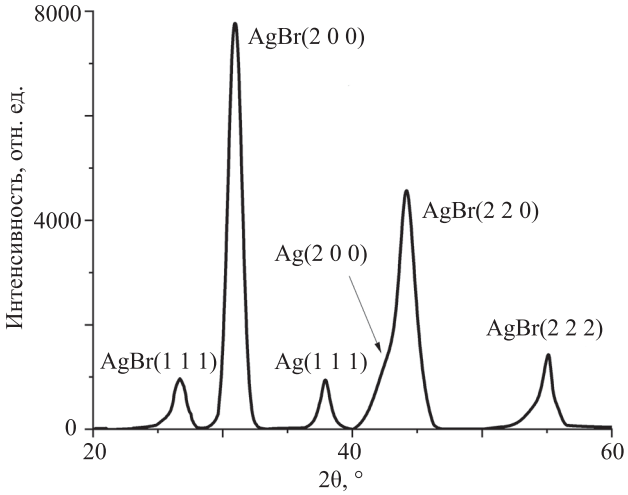



*Рис. 3*. Дифрактограмма стекла GAgBr после ионного обмена и термообработки

*Fig. 3*. XRD patterns of GAgBr glass after ion exchange and heat treatment

МОК обладает полосой поглощения с максимумом в области 450–470 нм [31]. Как показывают результаты эксперимента, МОК практически не взаимодействует с излучением без фотокатализатора (рис. 5, *a*). Отношение $C/C_0$ в этом случае не уменьшается ниже 0,97.

На рис. 5, *b* представлены спектры поглощения водного раствора МОК с образцом стекла GAgBr без травления. С увеличением длительности УФ облучения уменьшается интенсивность полосы поглощения МОК. Величина отношения $C/C_0$ при облучении МОК

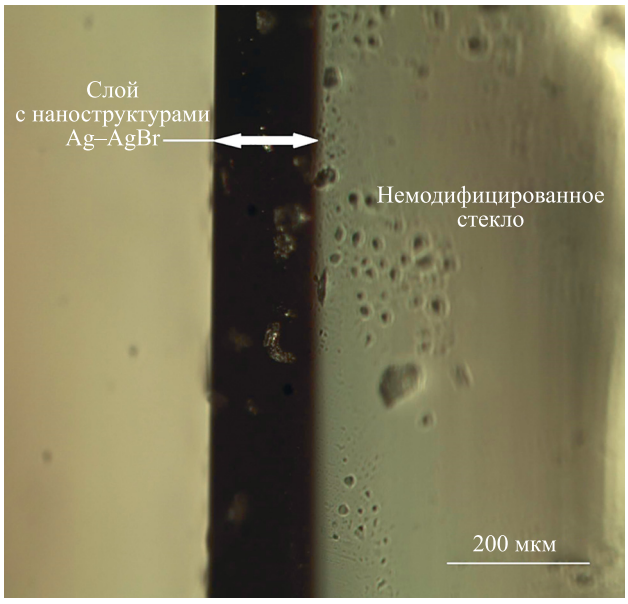



*Рис. 4*. Изображение скола стекла GAgBr с наночастицами Ag–AgBr, сформированными методом ионного обмена и последующей термообработки

*Fig. 4*. Image of a GAgBr glass cleavage with Ag–AgBr nanoparticles formed by ion exchange and subsequent heat treatment

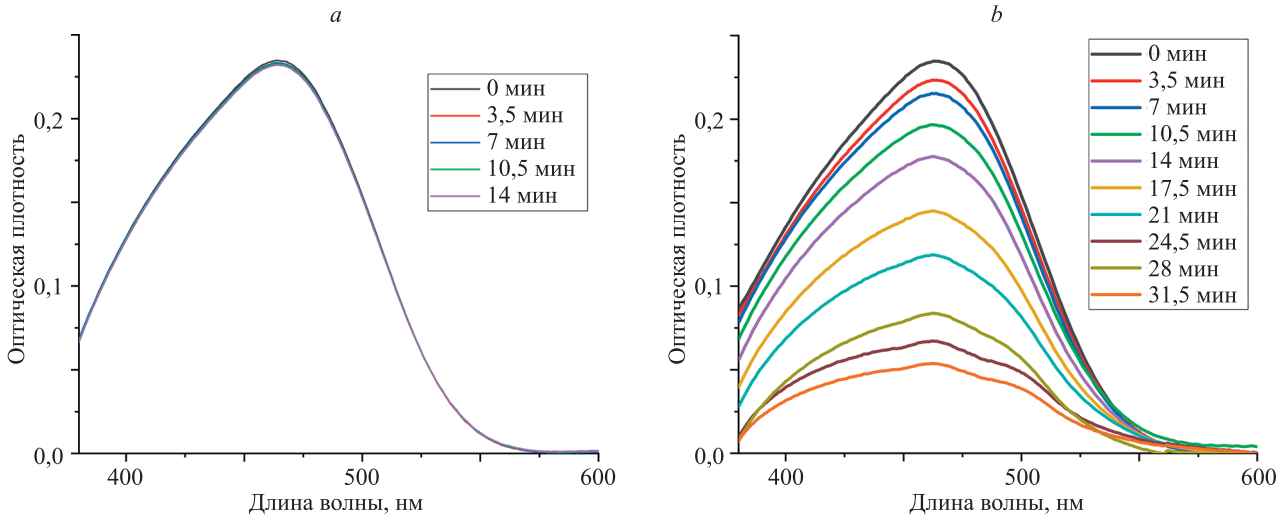



*Рис. 5*. Спектры поглощения водного раствора метилового оранжевого красителя после ультрафиолетового облучения (*a*) и с образцом GAgBr, не подвергавшимся травлению до и после ультрафиолетового облучения (*b*)

*Fig. 5*. Absorption spectra of an aqueous solution of methyl orange dye after ultraviolet irradiation (*a*) and with a GAgBr sample not subjected to etching before and after ultraviolet irradiation (*b*)

за первые 14 мин облучения составила 0,75, а далее — 0,23. УФ и видимое излучения могут поглощаться как наночастицами серебра, так и нанокристаллами бромида серебра. В этом случае генерируется большое количество электронно-дырочных пар. При этом дырки, сформированные в кристаллической оболочке бромида серебра, могут окислять ионы брома до атомарного состояния. С одной стороны, полученный $Br^0$, а с другой стороны дырки, сформированные на наночастицах серебра, могут окислять молекулу МОК [31].

На фотографии кюветы (рис. 6) показано обесцвечивание раствора с МОК, вызванное его деградацией после облучения в течение 31,5 мин в присутствии образца GAgBr.

Фотокатализатор GAgBr обесцвечивает раствор МОК на 77 %. Деградация МОК в присутствии фотокатализатора из бромидного НЦАС стекла после удаления тонких поверхностных слоев стекла толщинами 2 и 5 мкм с помощью химического травления составила 36 % и 15 % соответственно (рис. 7). Наиболее вероятная причина снижения фотокаталитической активности при удалении слоев стекла – наличие трещиноватого слоя стекла на поверхности образцов. Известно, что химическое травление приводит к повышению механической прочности стекла за счет удаления трещиноватого слоя [32]. В случае исследуемых образцов удаление трещиноватого слоя снижает площадь «рабочей» поверхности стекла с наноструктурами Ag–AgBr, что на-

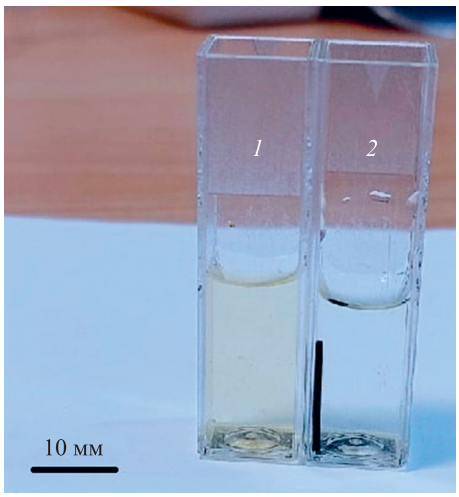



*Рис. 6*. Фото кюветы с водным раствором метилового оранжевого красителя до (*1*) и после (*2*) облучения с GAgBr. В кювете после облучения находится образец GAgBr

*Fig. 6*. Photo of a cuvette with an aqueous solution of methyl orange dye before (*1*) and after (*2*) irradiation with GAgBr. The cuvette after irradiation contains a sample of GAgBr

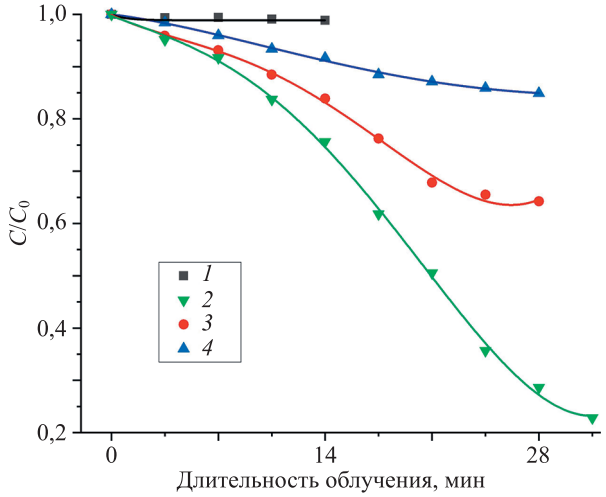



*Рис. 7*. График зависимости $C/C_0$ метилового оранжевого красителя (*1*) и с образцом GAgBr до (*2*) и после травления слоя 2 мкм (*3*) и 5 мкм (*4*) на длине волны 465 нм

*Fig. 7*. $C/C_0$ plot of methyl orange dye (*1*) and with a GAgBr sample before (*2*) and after etching of layers 2 μm (*3*) and 5 μm (*4*) at a wavelength of 465 nm

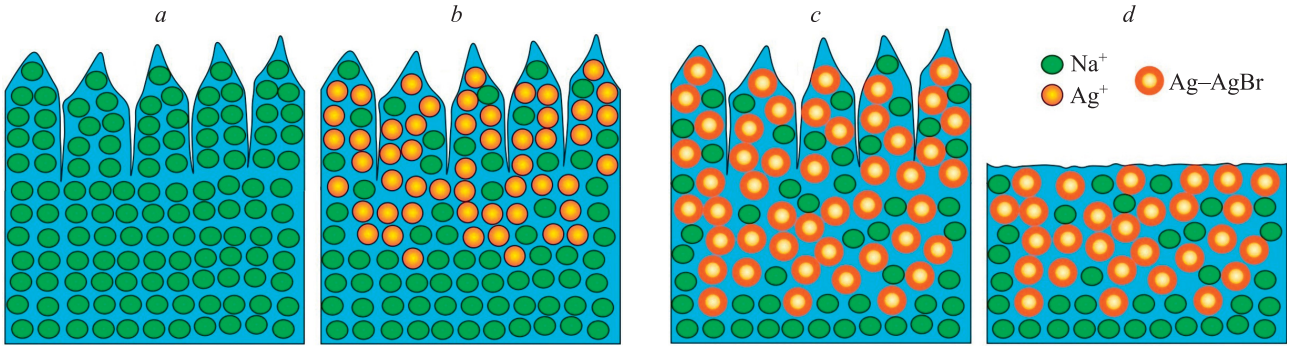



*Рис. 8*. Схема формирования наноструктур Ag–AgBr: исходное стекло (*a*); после ионного обмена (*b*); после термообработки (*c*); после травления (*d*)

*Fig. 8*. Scheme of the formation of Ag–AgBr nanostructures: initial glass (*a*); after ion exchange (*b*); after heat treatment (*c*); after etching (*d*)

ходит свое отражение в снижении степени деградации красителя. Схематично влияние химического травления на фотокаталитические свойства наноструктур в ионообменных слоях стекла представлено на рис. 8. Среди других вероятных причин, оказывающих влияние на фотокаталитические свойства наноструктур Ag–AgBr, стоит отметить уменьшение концентрации наноструктур, а также изменяющееся соотношение ионов серебра и брома по глубине стекла.

## Заключение

В работе исследованы спектральные свойства наноструктур Ag–AgBr, сформированные методом ионного обмена и последующей термообработки в бромидном натриево-цинк-алюмосиликатном стекле. Показано, что наноструктуры Ag–AgBr обладают высоким поглощением во всем видимом диапазоне. Усредненный размер кристаллов AgBr и серебряных наночастиц составил 6 и 2 нм соответственно.

Показана высокая фотокаталитическая активность наноструктур Ag–AgBr, сформированных в ионообменном слое натриево-цинк-алюмосиликатного стекла — на примере деградации метилового оранжевого красителя. Получено, что облучение ультрафиолетовым и видимым излучениями Ag–AgBr фотокатализатора приводит к деградации красителя на 77 %. Деградация красителя в присутствии фотокатализатора из бромидного натриево-цинк-алюмосиликатного стекла происходит посредством окисления молекулы красителя дырками, сформированными при облучении наноструктур Ag–AgBr. При удалении тонкого поверхностного слоя стекла посредством химического травления отмечено существенное снижение степени деградации метилового оранжевого красителя с 77 % до 15 % в связи с удалением рельефного и трещиноватого слоя стекла, что обусловлено снижением площади взаимодействия красителя с наноструктурами Ag–AgBr. Таким образом, натриево-цинк-алюмосиликатное стекло с наноструктурами Ag–AgBr показало себя перспективным фотокатализатором, который потенциально может быть использован в системах для разложения воды на водород и кислород для задач зеленой энергетики. Для уточнения механизмов фотокаталитического разложения метилового оранжевого красителя при взаимодействии с наноструктурами Ag–AgBr в стекле требуются дальнейшие эксперименты.

## Литература


1. Сосна М.Х., Масленникова М.В., Крючков М.В., Пустовалов М.В. «Зеленый» и/или «голубой» водород // Нефтегазохимия. 2020. № 3-4. С. 21–23. https://doi.org/10.24412/2310-8266-2020-3-4-21-23
2. Fu X., Chang H., Shang Z., Liu P., Liu J., Luo H. Three-dimensional $Cu_2O$ nanorods modified by hydrogen treated $Ti_3C_2TX$ MXene with enriched oxygen vacancies as a photocathode and a tandem cell for unassisted solar water splitting // Chemical Engineering Journal. 2020. V. 381. P. 122001. https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.122001
3. Wang L., Si W., Hou X., Wang M., Liu X., Ye Y., Hou F., Liang J. Novel integrated strategies toward efficient and stable unassisted photoelectrochemical water splitting // Sustainable Materials and Technologies. 2020. V. 25. P. e00209. https://doi.org/10.1016/j.susmat.2020.e00209
4. Liu Z., Hou W., Pavaskar P., Aykol M., Cronin S.B. Plasmon resonant enhancement of photocatalytic water splitting under visible illumination // Nano Letters. 2011. V. 11. N 3. P. 1111–1116. https://doi.org/10.1021/nl104005n
5. Hu Q., Liu B., Zhang Z., Song M., Zhao X. Temperature effect on the photocatalytic degradation of methyl orange under UV-vis light


## References


1. Sosna M.Kh., Kryuchkov M.V., Maslennikova M.V., Pustovalov M.V. “Green” and/or “Blue” hydrogen. *Oil & Gas Chemistry*, 2020, no. 3-4, pp. 21–23. (in Russian). https://doi.org/10.24412/2310-8266-2020-3-4-21-23
2. Fu X., Chang H., Shang Z., Liu P., Liu J., Luo H. Three-dimensional $Cu_2O$ nanorods modified by hydrogen treated $Ti_3C_2TX$ MXene with enriched oxygen vacancies as a photocathode and a tandem cell for unassisted solar water splitting. *Chemical Engineering Journal*, 2020, vol. 381, pp. 122001. https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.122001
3. Wang L., Si W., Hou X., Wang M., Liu X., Ye Y., Hou F., Liang J. Novel integrated strategies toward efficient and stable unassisted photoelectrochemical water splitting. *Sustainable Materials and Technologies*, 2020, vol. 25, pp. e00209. https://doi.org/10.1016/j.susmat.2020.e00209
4. Liu Z., Hou W., Pavaskar P., Aykol M., Cronin S.B. Plasmon resonant enhancement of photocatalytic water splitting under visible illumination. *Nano Letters*, 2011, vol. 11, no. 3, pp. 1111–1116. https://doi.org/10.1021/nl104005n

irradiation // Journal of Wuhan University of Technology-Mater Science Edition. 2010. V. 25. N 2. P. 210–213. https://doi.org/10.1007/s11595-010-2210-5
6. Kumar P., Govindaraju M., Senthamilselvi S., Premkumar K. Photocatalytic degradation of methyl orange dye using silver (Ag) nanoparticles synthesized from Ulva lactuca // Colloids and Surfaces B: Biointerfaces. 2013. V. 103. P. 658–661. https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2012.11.022
7. Jiang J., Li H., Zhang L. New insight into daylight photocatalysis of AgBr@Ag: Synergistic effect between semiconductor photocatalysis and plasmonic photocatalysis // Chemistry — A European Journal. 2012. V. 18. N 20. P. 6360–6369. https://doi.org/10.1002/chem.201102606
8. Wang H., Gao J., Guo T., Wang R., Guo L., Liu Y., Li J. Facile synthesis of AgBr nanoplates with exposed {111} facets and enhanced photocatalytic properties // Chemical Communications. 2012. V. 48. N 2. P. 275–277. https://doi.org/10.1039/c1cc16423f
9. Dong R., Tian B., Zeng C., Li T., Wang T., Zhang J. Ecofriendly synthesis and photocatalytic activity of uniform cubic Ag@AgCl plasmonic photocatalyst // Journal of Physical Chemistry C. 2013. V. 117. N 1. P. 213–220. https://doi.org/10.1021/jp311970k
10. Han L., Wang P., Zhu C., Zhai Y., Dong S. Facile solvothermal synthesis of cube-like Ag@AgCl: a highly efficient visible light photocatalyst // Nanoscale. 2011. V. 3. N 7. P. 2931–2935. https://doi.org/10.1039/c1nr10247h
11. Wang P., Huang B., Zhang X., Qin X., Jin H., Dai Y., Wang Z., Wei J., Zhan J., Wang S., Wang J., Whangbo M. Highly efficient visible-light plasmonic photocatalyst Ag@AgBr // Chemistry - A European Journal. 2009. V. 15. N 8. P. 1821–1824. https://doi.org/10.1002/chem.200802327
12. Saravanan R., Manoj D., Qin J., Naushad M., Gracia F., Lee A.F., Khan M.M., Gracia-Pinilla M.A. Mechanothermal synthesis of Ag/$TiO_2$ for photocatalytic methyl orange degradation and hydrogen production // Process Safety and Environmental Protection. 2018. V. 120. P. 339–347. https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.09.015
13. Shakeel M., Li B., Arif M., Yasin G., Rehman W., Khan A.U., Khan S., Khan A., Ali J. Controlled Synthesis of highly proficient and durable hollow hierarchical heterostructured (Ag-AgBr/HHST): A UV and Visible light active photocatalyst in degradation of organic pollutants // Applied Catalysis B: Environmental. 2018. V. 227. P. 433–445. https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2018.01.037
14. Li L., Yang X., Xie C., Wang Y., Wei L., Yang J. Synthesis and photocatalytic mechanism of visible-light-driven Ag/AgBr/(I/S) composites for organic dyes degradation // Optical Materials. 2022. V. 123. P. 111947. https://doi.org/10.1016/j.optmat.2021.111947
15. Sgibnev Y.M., Nikonorov N.V., Ignatiev A.I. High efficient luminescence of silver clusters in ion-exchanged antimony-doped photo-thermo-refractive glasses: Influence of antimony content and heat treatment parameters // Journal of Luminescence. 2017. V. 188. P. 172–179. https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2017.04.028
16. Sgibnev Y., Asamoah B., Nikonorov N., Honkanen S. Tunable photoluminescence of silver molecular clusters formed in $Na^+$-$Ag^+$ ion-exchanged antimony-doped photo-thermo-refractive glass matrix // Journal of Luminescence. 2020. V. 226. P. 117411. https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2020.117411
17. Dubrovin V., Nikonorov N., Ignatiev A. Bromide photo-thermo-refractive glass for volume Bragg gratings and waveguide structure recording // Optical Materials Express. 2017. V. 7. N 7. P. 2280–2292. https://doi.org/10.1364/OME.7.002280
18. Dubrovin V.D., Ignatiev A.I., Nikonorov N.V. Chloride photo-thermo-refractive glasses // Optical Materials Express. 2016. V. 6. N 5. P. 1701–1713. https://doi.org/10.1364/ome.6.001701
19. Sgibnev Y., Nikonorov N., Ignatiev A. Governing functionality of silver ion-exchanged photo-thermo-refractive glass matrix by small additives // Applied Sciences. 2021. V. 11. N 9. P. 3891. https://doi.org/10.3390/app11093891
20. White J.M., Heidrich P.F. Optical waveguide refractive index profiles determined from measurement of mode indices: a simple analysis // Applied Optics. 1976. V. 15. N 1. P. 151–155. https://doi.org/10.1364/AO.15.000151
21. Patterson A.L. The Scherrer formula for X-ray particle size determination // Physical Review. 1939. V. 56. N 10. P. 978. https://doi.org/10.1103/PhysRev.56.978
22. Devesa S., Rooney A.P., Graça M.P., Cooper D., Costa L.C. Williamson-hall analysis in estimation of crystallite size and lattice strain in $Bi_{1.34}Fe_{0.66}Nb_{1.34}O_{6.35}$ prepared by the sol-gel method //

5. Hu Q., Liu B., Zhang Z., Song M., Zhao X. Temperature effect on the photocatalytic degradation of methyl orange under UV-vis light irradiation. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater Science Edition*, 2010, vol. 25, no. 2, pp. 210–213. https://doi.org/10.1007/s11595-010-2210-5
6. Kumar P., Govindaraju M., Senthamilselvi S., Premkumar K. Photocatalytic degradation of methyl orange dye using silver (Ag) nanoparticles synthesized from Ulva lactuca. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2013, vol. 103, pp. 658–661. https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2012.11.022
7. Jiang J., Li H., Zhang L. New insight into daylight photocatalysis of AgBr@Ag: Synergistic effect between semiconductor photocatalysis and plasmonic photocatalysis. *Chemistry — A European Journal*, 2012, vol. 18, no. 20, pp. 6360–6369. https://doi.org/10.1002/chem.201102606
8. Wang H., Gao J., Guo T., Wang R., Guo L., Liu Y., Li J. Facile synthesis of AgBr nanoplates with exposed {111} facets and enhanced photocatalytic properties. *Chemical Communications*, 2012, vol. 48, no. 2, pp. 275–277. https://doi.org/10.1039/c1cc16423f
9. Dong R., Tian B., Zeng C., Li T., Wang T., Zhang J. Ecofriendly synthesis and photocatalytic activity of uniform cubic Ag@AgCl plasmonic photocatalyst. *Journal of Physical Chemistry* C, 2013, vol. 117, no. 1, pp. 213–220. https://doi.org/10.1021/jp311970k
10. Han L., Wang P., Zhu C., Zhai Y., Dong S. Facile solvothermal synthesis of cube-like Ag@AgCl: a highly efficient visible light photocatalyst. *Nanoscale*, 2011, vol. 3, no. 7, pp. 2931–2935. https://doi.org/10.1039/c1nr10247h
11. Wang P., Huang B., Zhang X., Qin X., Jin H., Dai Y., Wang Z., Wei J., Zhan J., Wang S., Wang J., Whangbo M. Highly efficient visible-light plasmonic photocatalyst Ag@AgBr. *Chemistry — A European Journal*, 2009, vol. 15, no. 8, pp. 1821–1824. https://doi.org/10.1002/chem.200802327
12. Saravanan R., Manoj D., Qin J., Naushad M., Gracia F., Lee A.F., Khan M.M., Gracia-Pinilla M.A. Mechanothermal synthesis of Ag/$TiO_2$ for photocatalytic methyl orange degradation and hydrogen production. *Process Safety and Environmental Protection*, 2018, vol. 120, pp. 339–347. https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.09.015
13. Shakeel M., Li B., Arif M., Yasin G., Rehman W., Khan A.U., Khan S., Khan A., Ali J. Controlled Synthesis of highly proficient and durable hollow hierarchical heterostructured (Ag-AgBr/HHST): A UV and Visible light active photocatalyst in degradation of organic pollutants. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2018, vol. 227, pp. 433–445. https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2018.01.037
14. Li L., Yang X., Xie C., Wang Y., Wei L., Yang J. Synthesis and photocatalytic mechanism of visible-light-driven Ag/AgBr/(I/S) composites for organic dyes degradation. *Optical Materials*, 2022, vol. 123, pp. 111947. https://doi.org/10.1016/j.optmat.2021.111947
15. Sgibnev Y.M., Nikonorov N.V., Ignatiev A.I. High efficient luminescence of silver clusters in ion-exchanged antimony-doped photo-thermo-refractive glasses: Influence of antimony content and heat treatment parameters. *Journal of Luminescence*, 2017, vol. 188, pp. 172–179. https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2017.04.028
16. Sgibnev Y., Asamoah B., Nikonorov N., Honkanen S. Tunable photoluminescence of silver molecular clusters formed in $Na^+$-$Ag^+$ ion-exchanged antimony-doped photo-thermo-refractive glass matrix. *Journal of Luminescence*, 2020, vol. 226, pp. 117411. https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2020.117411
17. Dubrovin V., Nikonorov N., Ignatiev A. Bromide photo-thermo-refractive glass for volume Bragg gratings and waveguide structure recording. *Optical Materials Express*, 2017, vol. 7, no. 7, pp. 2280–2292. https://doi.org/10.1364/OME.7.002280
18. Dubrovin V.D., Ignatiev A.I., Nikonorov N.V. Chloride photo-thermo-refractive glasses. *Optical Materials Express*, 2016, vol. 6, no. 5, pp. 1701–1713. https://doi.org/10.1364/ome.6.001701
19. Sgibnev Y., Nikonorov N., Ignatiev A. Governing functionality of silver ion-exchanged photo-thermo-refractive glass matrix by small additives. *Applied Sciences*, 2021, vol. 11, no. 9, pp. 3891. https://doi.org/10.3390/app11093891
20. White J.M., Heidrich P.F. Optical waveguide refractive index profiles determined from measurement of mode indices: a simple analysis. *Applied Optics*, 1976, vol. 15, no. 1, pp. 151–155. https://doi.org/10.1364/AO.15.000151
21. Patterson A.L. The Scherrer formula for X-ray particle size determination. *Physical Review*, 1939, vol. 56, no. 10, pp. 978. https://doi.org/10.1103/PhysRev.56.978

Materials Science & Engineering B. 2021. V. 263. P. 114830. https://doi.org/10.1016/j.mseb.2020.114830
23. Mustapha S., Ndamitso M., Abdulkareem A.S., Tijani J.O., Shuaib D.T., Mohammed A.K., Sumaila A. Comparative study of crystallite size using Williamson-Hall and Debye-Scherrer plots for ZnO nanoparticles // Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology. 2019. V. 10. N 4. P. 045013. https://doi.org/10.1088/2043-6254/ab52f7
24. Leontyev I.N., Kuriganova A.B., Allix M., Rakhmatullin A., Timoshenko P.E., Maslova O.A., Mikheykin A.S., Smirnova N.V. On the evaluation of the average crystalline size and surface area of platinum catalyst nanoparticles // Physica Status Solidi (B). 2018. V. 255. N 10. P. 1800240. https://doi.org/10.1002/pssb.201800240
25. Bokuniaeva A.O., Vorokh A.S. Estimation of particle size using the Debye equation and the Scherrer formula for polyphasic $TiO_2$ powder // Journal of Physics: Conference Series. 2019. V. 1410. N 1. P. 012057. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1410/1/012057
26. Sgibnev Y.M., Nikonorov N.V., Vasilev V.N., Ignatiev A.I. Optical gradient waveguides in photo-thermo-refractive glass formed by ion exchange method // Journal of Lightwave Technology. 2015. V. 33. N 17. P. 3730–3735. https://doi.org/10.1109/JLT.2015.2456239
27. Sgibnev E.M., Ignatiev A.I., Nikonorov N.V., Efimov A.M., Postnikov E.S. Effects of silver ion exchange and subsequent treatments on the UV–VIS spectra of silicate glasses. I. Undoped, $CeO_2$-doped, and ($CeO_2$+$Sb_2O_3$)-codoped photo-thermo-refractive matrix glasses // Journal of Non-Crystalline Solids. 2013. V. 378. P. 213–226. https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2013.07.010
28. Findakly V. Glass waveguides by ion exchange: a review // Optical Engineering. 1985. V. 24. N 2. P. 244–250. https://doi.org/10.1117/12.7973463
29. Miao X., Ji Z., Wu J., Shen X., Wang J., Kong L., Liu M., Song C. g-$C_3N_4$/AgBr nanocomposite decorated with carbon dots as a highly efficient visible-light-driven photocatalyst // Journal of Colloid and Interface Science. 2017. V. 502. P. 24–32. https://doi.org/10.1016/j.jcis.2017.04.087
30. Xie R., Zhang L., Xu H., Zhong Y., Sui X., Mao Z. Fabrication of Z-scheme photocatalyst Ag-AgBr@$Bi_{20}TiO_{32}$ and its visible-light photocatalytic activity for the degradation of isoproturon herbicide // Journal of Molecular Catalysis A: Chemical. 2015. V. 406. P. 194–203. https://doi.org/10.1016/j.molcata.2015.05.028
31. Kuai L., Geng B., Chen X., Zhao Y., Luo Y. Facile subsequently light-induced route to highly efficient and stable sunlight-driven Ag-AgBr plasmonic photocatalyst // Langmuir. 2010. V. 26. N 24. P. 18723–18727. https://doi.org/10.1021/la104022g
32. Никоноров Н.В., Евстропьев С.К. Оптическое материаловедение: Основы прочности оптического стекла: учебное пособие. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2009. 102 с.

22. Devesa S., Rooney A.P., Graça M.P., Cooper D., Costa L.C. Williamson-hall analysis in estimation of crystallite size and lattice strain in $Bi_{1.34}Fe_{0.66}Nb_{1.34}O_{6.35}$ prepared by the sol-gel method. *Materials Science & Engineering B*, 2021, vol. 263, pp. 114830. https://doi.org/10.1016/j.mseb.2020.114830
23. Mustapha S., Ndamitso M., Abdulkareem A.S., Tijani J.O., Shuaib D.T., Mohammed A.K., Sumaila A. Comparative study of crystallite size using Williamson-Hall and Debye-Scherrer plots for ZnO nanoparticles. *Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology*, 2019, vol. 10, no. 4, pp. 045013. https://doi.org/10.1088/2043-6254/ab52f7
24. Leontyev I.N., Kuriganova A.B., Allix M., Rakhmatullin A., Timoshenko P.E., Maslova O.A., Mikheykin A.S., Smirnova N.V. On the evaluation of the average crystalline size and surface area of platinum catalyst nanoparticles. *Physica Status Solidi (B)*, 2018, vol. 255, no. 10, pp. 1800240. https://doi.org/10.1002/pssb.201800240
25. Bokuniaeva A.O., Vorokh A.S. Estimation of particle size using the Debye equation and the Scherrer formula for polyphasic $TiO_2$ powder. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, vol. 1410, no. 1, pp. 012057. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1410/1/012057
26. Sgibnev Y.M., Nikonorov N.V., Vasilev V.N., Ignatiev A.I. Optical gradient waveguides in photo-thermo-refractive glass formed by ion exchange method. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, vol. 33, no. 17, pp. 3730–3735. https://doi.org/10.1109/JLT.2015.2456239
27. Sgibnev E.M., Ignatiev A.I., Nikonorov N.V., Efimov A.M., Postnikov E.S. Effects of silver ion exchange and subsequent treatments on the UV–VIS spectra of silicate glasses. I. Undoped, $CeO_2$-doped, and ($CeO_2$+$Sb_2O_3$)-codoped photo-thermo-refractive matrix glasses. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2013, vol. 378, pp. 213–226. https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2013.07.010
28. Findakly V. Glass waveguides by ion exchange: a review. *Optical Engineering*, 1985, vol. 24, no. 2, pp. 244–250. https://doi.org/10.1117/12.7973463
29. Miao X., Ji Z., Wu J., Shen X., Wang J., Kong L., Liu M., Song C. g-$C_3N_4$/AgBr nanocomposite decorated with carbon dots as a highly efficient visible-light-driven photocatalyst. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2017, vol. 502, pp. 24–32. https://doi.org/10.1016/j.jcis.2017.04.087
30. Xie R., Zhang L., Xu H., Zhong Y., Sui X., Mao Z. Fabrication of Z-scheme photocatalyst Ag-AgBr@$Bi_{20}TiO_{32}$ and its visible-light photocatalytic activity for the degradation of isoproturon herbicide. *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*, 2015, vol. 406, pp. 194–203. https://doi.org/10.1016/j.molcata.2015.05.028
31. Kuai L., Geng B., Chen X., Zhao Y., Luo Y. Facile subsequently light-induced route to highly efficient and stable sunlight-driven Ag-AgBr plasmonic photocatalyst. *Langmuir*, 2010, vol. 26, no. 24, pp. 18723–18727. https://doi.org/10.1021/la104022g
32. Nikonorov N.V., Evstropev S.K. *Optical Materials Science. Fundamentals of Optical Glass Strength*. Tutorial. St. Petersburg, SPbSU ITMO, 2009, 102 p. (in Russian)

## Авторы

**Марасанов Дмитрий Вячеславович** — аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, SC 57195673419, https://orcid.org/0000-0001-8480-2016, Dmitriymarasanov@bk.ru

**Сгибнев Евгений Михайлович** — кандидат физико-математических наук, ведущий инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, SC 56784249300, https://orcid.org/0000-0002-2840-9479, sgibnevem@gmail.com

**Никоноров Николай Валентинович** — доктор физико-математических наук, профессор, профессор, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, SC 7003772604, https://orcid.org/0000-0002-1341-067X, nikonorov@oi.ifmo.ru

## Authors

**Dmitriy V. Marasanov** — PhD Student, ITMO University, Saint Peterburg, 197101, Russian Federation, SC 57195673419, https://orcid.org/0000-0001-8480-2016, Dmitriymarasanov@bk.ru

**Yevgeniy M. Sgibnev** — PhD (Physics & Mathematics), Leading Engineer, ITMO University, Saint Peterburg, 197101, Russian Federation, SC 56784249300, https://orcid.org/0000-0002-2840-9479, sgibnevem@gmail.com

**Nikolay V. Nikonorov** — D. Sc. (Physics & Mathematics), Full Professor, ITMO University, Saint Peterburg, 197101, Russian Federation, SC 7003772604, https://orcid.org/0000-0002-1341-067X, nikonorov@oi.ifmo.ru

*Статья поступила в редакцию 31.03.2022*
*Одобрена после рецензирования 11.04.2022*
*Принята к печати 25.05.2022*

*Received 31.03.2022*
*Approved after reviewing 11.04.2022*
*Accepted 25.05.2022*

Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ
май–июнь 2022 Том 22 № 3 http://ntv.ifmo.ru/
SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL OF INFORMATION TECHNOLOGIES, MECHANICS AND OPTICS
May–June 2022 Vol. 22 No 3 http://ntv.ifmo.ru/en/
ISSN 2226-1494 (print) ISSN 2500-0373 (online)

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК УНИВЕРСИТЕТ ИТМО
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ

КОМПЬЮТЕРНЫЕ СИСТЕМЫ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

COMPUTER SCIENCE

doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-3-517-527
УДК 004.421.2:519.17 004.657

# Формализация языков частично упорядоченных мультимножеств в системе Coq для спецификации слабых моделей памяти

**Евгений Александрович Моисеенко[1]✉, Владимир Петрович Гладштейн[2], Антон Викторович Подкопаев[3], Дмитрий Владимирович Кознов[4]**

[1,2,4] Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, 199034, Российская Федерация
[1,2,3] JetBrains Research, Санкт-Петербург, 194100, Российская Федерация
[3] Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Санкт-Петербург, 194100, Российская Федерация

[1] e.moiseenko@2012.spbu.ru✉, https://orcid.org/0000-0003-2715-1143
[2] vovaglad00@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-9233-3133
[3] apodkopaev@hse.ru, https://orcid.org/0000-0002-9448-6587
[4] d.koznov@spbu.ru, https://orcid.org/0000-0003-2632-3193

**Аннотация**

**Предмет исследования.** Модели памяти задают семантику многопоточных программ, работающих с разделяемой памятью. В настоящее время эта область активно развивается, создаются новые модели памяти, востребованы новые средства формализации таких моделей, а также способы и средства доказательства их свойств. В работе рассмотрена задача формальной спецификации моделей памяти в системах интерактивного доказательства теорем. **Метод.** Использован семантический домен языков частично упорядоченных мультимножеств или языков помсетов. Предложен метод кодировки семантического домена с помощью фактор-типов и обсуждены его достоинства и недостатки. **Основные результаты.** Представлена библиотека, разработанная в системе Coq, реализующая предложенный метод. В рамках библиотеки установлена взаимосвязь языков помсетов с традиционной операционной семантикой, заданной в терминах помеченных систем переходов. Это позволило специфицировать в Coq модели памяти, параметризованные операционной семантикой структуры данных, и, таким образом, разделить определения модели памяти и структуры данных. **Практическая значимость.** Предложенная библиотека может быть использована для формальной спецификации и доказательства свойств широкого класса моделей памяти. Чтобы продемонстрировать это, в работе приведена формализация нескольких базовых моделей, а именно, моделей последовательной, причинной и конвейерной согласованности.

**Ключевые слова**

модели памяти, языки помсетов, формальная семантика, системы интерактивного доказательства теорем

**Благодарности**

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-31-90088.

**Ссылка для цитирования:** Моисеенко Е.А., Гладштейн В.П., Подкопаев А.В., Кознов Д.В. Формализация языков частично упорядоченных мультимножеств в системе Coq для спецификации слабых моделей памяти // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2022. Т. 22, № 3. С. 517–527. doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-3-517-527

# Mechanization of pomset languages in the Coq proof assistant for the specification of weak memory models

**Evgenii A. Moiseenko[1]✉, Vladimir P. Gladstein[2], Anton V. Podkopaev[3], Dmitry V. Koznov[4]**

[1,2,4] Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, 199034, Russian Federation
[1,2,3] JetBrains Research, Saint Petersburg, 194100, Russian Federation
[3] HSE University, Saint Petersburg, 194100, Russian Federation

© Моисеенко Е.А., Гладштейн В.П., Подкопаев А.В., Кознов Д.В., 2022

[1] e.moiseenko@2012.spbu.ru✉, https://orcid.org/0000-0003-2715-1143
[2] vovaglad00@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-9233-3133
[3] apodkopaev@hse.ru, https://orcid.org/0000-0002-9448-6587
[4] d.koznov@spbu.ru, https://orcid.org/0000-0003-2632-3193

**Abstract**
Memory models define semantics of concurrent programs operating on shared memory. Theory of these models is an active research topic. As new models emerge, the problem of providing a rigorous formal specification of these models becomes relevant. In this paper we consider a problem of formalizing memory models in the interactive theorem proving systems. We use semantic domain of pomset languages to formalize memory models. We propose an encoding of pomset languages using quotient types and discuss advantages and shortcomings of this approach. We present a library developed in the Coq proof assistant that implements the proposed approach. As a part of this library, we establish a connection between pomset languages and operational semantics defined by labeled transition systems. With the help of this theory, it becomes possible to define in Coq memory models parameterized by the operational semantics of an abstract datatype, and thus to decouple the definition of a memory model from the definition of the datatype. The proposed library can be used to develop formal machine-checked specifications of a wide class of memory models. In order to demonstrate its applicability, we present specifications of several basic memory models: sequential, causal, and pipelined consistency.

**Keywords**
memory models, pomset languages, formal semantics, interactive theorem proving

**Aknowledgements**
The reported study was funded by RFBR, project number № 20-31-90088.

**For citation:** Moiseenko E.V., Gladstein V.P., Podkopaev A.V, Koznov D.V. Mechanization of pomset languages in the Coq proof assistant for the specification of weak memory models. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2022, vol. 22, no. 3, pp. 517–527 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-3-517-527

## Введение

В последнее время получили широкое распространение многопоточные и распределенные программные системы. Соответственно, актуальной задачей является повышение надежности таких систем. В связи с этим активно развивается теория моделей памяти [1]: появляются спецификации моделей памяти процессоров, например, Intel [2], POWER [3], ARM [4], языков программирования C/C++ [5], Java [6, 7], LLVM [8], JavaScript [9], а также моделей памяти распределенных систем [10–12]. Подобные спецификации известны своей сложностью, а в доказательствах их ключевых свойств «на бумаге» нередко находятся существенные ошибки [13, 14]. По этой причине стандартной практикой становится формализация данных спецификации в интерактивных системах доказательства теорем, таких как Coq[1], Isabelle[2], Agda[3]. Эти системы позволяют сформулировать математические утверждения и их доказательства на специальном языке, а затем автоматически проверить корректность этих доказательств. Данные системы используются как для формализации математических теорий [15], так и для разработки корректного программного обеспечения [16].

При формализации семантики многопоточных программ используют либо подходы, основанные на операционной семантике с чередованием (interleaving semantics), либо подходы на основе так называемых *моделей истинной конкурентности* (*true concurrency*), куда обычно относят такие формализмы, как языки частично упорядоченных мультимножеств (или языки помсетов) [17, 18], трассы Мацуркиевича [19], структуры событий [20], сети Петри [21] и другие. Особенность моделей истинной конкурентности в том, что они позволяют явно выразить причинно-следственные связи между атомарными событиями системы и не рассматривать все возможные чередования параллельных процессов. Благодаря данной особенности в теории моделей памяти в последние годы возобновился интерес к этим формализмам [11, 22, 23]. Отметим, что формализмы активно используются при разработке инструментов верификации многопоточных программ и лежат в основе известной техники оптимизации под названием *редукция частичных порядков* (*partial order reduction*) [24, 25]. Тем не менее существующие работы либо не формализуют спецификации моделей в системах доказательства теорем [10, 11], либо используют для формализации неклассические варианты моделей истинной конкурентности [22], которые не всегда сохраняют их свойства, и не позволяют использовать известные теоретические результаты о моделях и их взаимосвязи [26–28].

Цель работы — формализация теории моделей истинной конкурентности [26] в системах интерактивного доказательства теорем. Рассмотрена проблема формализации одной из моделей истинной конкурентности — языков помсетов — в системе Coq. Предложен метод кодировки семантического домена с помощью *фактор-типов* (*quotient types*) [29]. Представлена библиотека[4], реализующая данный метод и разработанная с использованием расширения SSReflect [30] и библиотеки формализованных математических тео-

[1] The Coq Proof Assistant (2021) [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://doi.org/10.5281/zenodo.4501022 (дата обращения: 21.03.2022).

[2] Isabelle Proof Assistant [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://isabelle.in.tum.de/ (дата обращения: 21.03.2022).

[3] Agda language reference [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://agda.readthedocs.io/ (дата обращения: 21.03.2022).

[4] Библиотека доступна по адресу [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://github.com/event-structures/event-struct (дата обращения: 21.03.2022).

рий Mathcomp[1]. Выполнено обсуждение ограничений предложенного метода, предложены возможные пути их преодоления.

В рамках разработанной библиотеки раскрыта взаимосвязь домена языков помсетов и традиционных операционных семантик, заданных в терминах помеченных систем переходов. Это позволяет задавать модели памяти, параметризованные операционной семантикой абстрактной структуры данных [10], и отделить определения модели памяти и структуры данных. В качестве примера приведены спецификации трех базовых моделей памяти, имеющих важное практическое значение [10]: последовательной согласованности (sequential consistency), причинной согласованности (causal consistency), и конвейерной согласованности (pipelined consistency). На основе примеров сделан вывод, что широкий класс моделей, которые сохраняют программный порядок [1] и задаются относительно последовательной спецификации структуры данных, может быть выражен в терминах языков помсетов, и что кодирование помсетов с помощью фактор-типов подходит для представления этих моделей в системах доказательства теорем.

### Модели памяти и языки помсетов

Формальная семантика многопоточной или распределенной программы, работающей с некоторыми разделяемыми ресурсами, определяется моделью согласованности. Традиционно модели согласованности задаются для абстракции разделяемой памяти [1], т. е. индексированного множества ячеек памяти. В этом контексте модели согласованности обычно называются *моделями памяти* (*memory model*). Рассмотрим подходы к формализации моделей памяти с помощью операционных семантик и языков помсетов.

**Операционная семантика.** Традиционным способом формального описания поведения программы (в том числе и модели памяти) является использование операционной семантики, заданной в терминах помеченных систем переходов [31]. Система помеченных переходов является тройкой $\Sigma = (S, L, \rightarrow)$, где $S$ — множество состояний; $L$ — множество меток; символ «$\rightarrow$» — отношение перехода или множество троек $(l, s, s') \in L \times S \times S$, обозначаемых как $s \xrightarrow{l} s'$. Для фиксированного начального состояния $s_0$ система переходов порождает язык, принимаемый в данном состоянии $Lang(\Sigma, s_0)$, т. е. последовательность меток $l_1, \ldots, l_n \in L$, таких, что существует трасса $s_0 \xrightarrow{l_1} s_1 \xrightarrow{l_2} s_2 \xrightarrow{l_3} l_3 \ldots \xrightarrow{l_n} s_n$.

В рамках операционной семантики поведение многопоточной программы, состоящей из нескольких параллельных процессов, может быть определено как поочередное исполнение атомарных действий процессов. Например, на рис. 1 показан пример многопоточной программы, состоящей из четырех потоков, выполняющих операции чтения и записи в разделяемые переменные $x$ и $y$, а также один из ее возможных сценариев

$$x := 1 \;\Big\|\; y := 1 \;\Big\|\; \begin{matrix} r_1 := x \\ r_2 := y \end{matrix} \;\Big\|\; \begin{matrix} r_3 := y \\ r_4 := x \end{matrix}$$

$$t_1 : W_x1 \rightarrow t_2 : W_y1 \rightarrow t_3 : R_x1 \rightarrow t_3 : R_y1 \rightarrow t_4 : R_y1 \rightarrow t_4 : R_x1$$

*Рис. 1*. Пример многопоточной программы и ее последовательно согласованного сценария исполнения

*Fig. 1*. Example of the multithreaded program and its sequentially consistent execution

исполнения. Этот сценарий задается последовательностью меток вида $t{:}l$, где $t \in T$ — идентификатор потока; $l := W_x(v)|R_x(v)$ — метка операции: или операции чтения, или операции записи значения $v$ в разделяемую переменную $x$.

Модель памяти, которая допускает только сценарии поведения, полученные как результат последовательного поочередного исполнения инструкций процессоров, называется *моделью последовательной согласованности* [32]. Реализация данной модели в многопоточных и распределенных системах приводит к значительным накладным расходам [33]. Потому на практике часто используются более слабые модели, допускающие больше возможных сценариев исполнения программы [34].

Например, в рамках *модели причинной согласованности* [10], которая описывает поведение распределенной системы с обменом сообщениями, для программы на рис. 1 допускается также сценарий поведения, в котором третий и четвертый потоки наблюдают обновление переменных $x$ и $y$ в разном порядке (рис. 2).

Видно, что поток $t_3$ сначала выполняет операцию чтения $R_x1$, а затем — $R_y0$, в то время как поток $t_4$ сначала выполняет $R_y1$, а затем $R_x0$. Дело в том, что модель причинной согласованности определяет порядок «происходит-до» (happens-before) как объединение программного порядка внутри потоков и порядка обмена сообщениями между потоками, а затем предписывает, что только операции записи, связанные отношением «происходит-до», должны наблюдаться всеми потоками в одинаковом порядке. Поскольку потоки $t_1$ и $t_2$ не обмениваются сообщениями, то операции записи $W_x1$ и $W_y1$ не упорядочены отношением «происходит-до» и могут наблюдаться другими потоками в произвольном порядке.

Поведение программы в рамках модели причинной согласованности также можно определить в терминах системы помеченных переходов, например, с помощью так называемых *векторных часов* (*vector clock*) [34]. Проблема заключается в том, что для кодирования каждой модели согласованности необходимо использовать различные техники и структуры данных, например, буферы операций записи, очереди сообщений и т. п.

**Языки помсетов.** Чтобы задавать различные модели памяти декларативно и единообразно, используют-

$$t_1 : W_x1 \rightarrow t_2 : W_y1 \rightarrow t_3 : R_x1 \rightarrow t_3 : R_y0 \rightarrow t_4 : R_y1 \rightarrow t_4 : R_x0$$

*Рис. 2*. Пример причинно согласованного сценария исполнения программы

*Fig. 2*. Example of the causally consistent execution

[1] Mathematical components [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://github.com/math-comp/math-comp/ (дата обращения: 21.03.2022).

ся модели на основе отношения частичного порядка, заданного на атомарных действиях системы [10, 35], например, языки помсетов [17].

Языки помсетов — обобщение понятия обычного «последовательного» языка, т. е. множества слов некоторого алфавита. Обобщение заключается в переходе от линейного порядка символов в рамках слова к частичному порядку. В контексте параллельных вычислений частичный порядок представляет один сценарий исполнения параллельной программы. Носитель порядка состоит из событий — атомарных шагов вычисления. Каждому событию присваивается семантическая метка. Если событие $e_1$ упорядочено с $e_2$, т. е. $e_1 \le e_2$, то полагается, что появление события $e_2$ зависит от появления $e_1$. Если не верно ни $e_1 \le e_2$, ни $e_2 \le e_1$, тогда события $e_1$ и $e_2$ полагаются параллельными, что обозначается как $e_1 \asymp e_2$. Это означает, что события могут быть исполнены последовательным вычислителем в любом порядке.

На рис. 3 показан пример помсета. В данном помсете каждому событию соответствует уникальная метка. События с метками $t_1 : W_x1$ и $t_2 : W_y1$ являются параллельными и оба предшествуют событию с меткой $t_3 : R_x1$, которое, в свою очередь, предшествует $t_3 : R_y1$.

Формально, помеченное частично упорядоченное множество — тройка $(E, \lambda, \le)$ следующего вида:

— $E$ — носитель, и элементы множества в контексте данной работы называются *событиями*;
— $\lambda$ — функция с сигнатурой $E \to L$, отображающая события в *метки*;
— $\le$ — частичный порядок *причинно-следственной связи* между событиями.

Запись $Poset_L$ обозначает множество всех частично упорядоченных множеств, помеченных метками типа $L$.

Заметим, что идентификаторы событий сами по себе неважны, а важны лишь их метки и порядок между ними. Таким образом, с помеченными частично упорядоченными множествами работают по модулю переименования событий или, другими словами, с точностью до изоморфизма. Следующие определения формализуют эти идеи.

Пусть $p, q \in Poset_L$, и дана функция $f : E_p \to E_q$.

Введем следующие свойства:

— если $\lambda_q(f(e)) = \lambda_p(e)$, то будем называть такую функцию *сохраняющей метки* (*label preserving*);
— если $e_1 \le_p e_2$ влечет $f(e_1) \le_q f(e_2)$, то будем называть такую функцию *сохраняющей порядок* (*order preserving*);
— если $e_1 \le_p e_2$ тогда и только тогда, когда $f(e_1) \le_q f(e_2)$, то будем называть такую функцию *вкладывающей порядок* (*order embedding*).

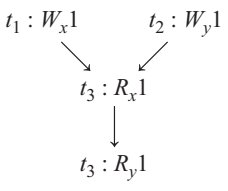



*Рис. 3*. Пример помсета
*Fig. 3*. Example of the pomset

Функция, сохраняющая и метки, и порядок, называется *гомоморфизмом*. Биективная функция, сохраняющая метки и вкладывающая порядок называется *изоморфизмом*. Будем писать $p \cong q$, если существует изоморфизм между $p$ и $q$. Классы эквивалентности помеченных частичных порядков по модулю изоморфизма называются *помсетами*: $Pomset_L \triangleq Poset_L/\cong$. Таким образом, *язык помсетов* — множество помсетов: $Pomlang_L \triangleq \mathcal{P}(Pomset_L)$.

**Линеаризация помсетов.** В простейшем случае язык помсетов $P$ можно связать с последовательным языком, рассмотрев множество линеаризаций частичных порядков $Lin(P)$, т. е. их дополнений до полных порядков. Будем говорить, что помсет $p$ *поглощается* (*subsumed by*) $q$, что обозначается как $p \sqsubseteq q$, если существует биективный гомоморфизм из $q$ в $p$. Интуитивно это означает, что множество $p$ более упорядоченно по сравнению с $q$. Язык $P$ *поглощается* $Q$, т. е. $P \sqsubseteq Q$, если для каждого $p \in P$ существует $q \in Q$, который его поглощает ($p \sqsubseteq q$). Тогда помсет $q$ является линеаризацией $p$, т. е. $q \in Lin(p)$, если он является полностью упорядоченным и поглощается $p$. Множество линеаризаций языка помсетов определяется как объединение линеаризаций всех помсетов, принадлежащих данному языку: $Lin(P) \triangleq \bigcup_{p \in P} Lin(p)$. Таким образом, имея последовательную спецификацию структуры данных $\Sigma = (S, L, \to)$ с начальным состоянием $s_0 \in S$, можно сказать, что язык помсетов $P$ соответствует $\Sigma$, если $Lin(P) = Lang(\Sigma, s_0)$.

На рис. 4 показан пример линеаризации помсета. Пунктирными стрелками продемонстрирован гомоморфизм – функция, отображающая события правого помсета в события левого помсета. Можно видеть, что помсет слева полностью упорядочен, а отображение событий биективно, сохраняет метки и порядок. Следовательно, помсет слева действительно является линеаризацией помсета справа.

**Модели памяти.** Модель памяти задается относительно последовательной структуры данных путем ослабления требования на множество линеаризаций языка помсетов. Обычно требуется только существование некоторой линеаризации, принадлежащей языку структуры данных. Будем говорить, что язык $P$ *сводится* к языку $Q$, и обозначается это как $P \hookrightarrow Q$, если для каждого $p \in P$ существует $q \in Q$, такой что $q \sqsubseteq p$. Тогда требование о том, чтобы для каждого $p \in P$ существова-

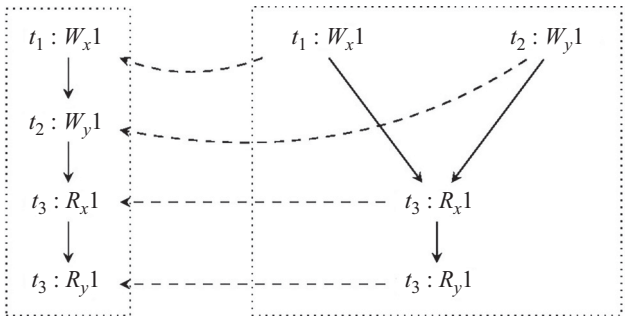



*Рис. 4*. Пример линеаризации помсета
*Fig. 4*. Example of the pomset linearization

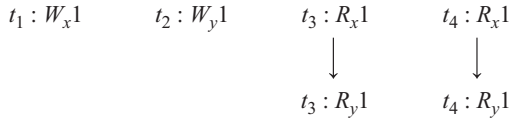



*Рис. 5*. Пример отношения программного порядка
*Fig. 5*. Example of the program order

ла линеаризация, принадлежащая языку системы переходов, выглядит следующим образом: $P \hookrightarrow Lang(\Sigma, s_0)$.

Например, в определении уже упомянутой модели последовательной согласованности рассматриваются линеаризации только *программного порядка* — порядка выполнения операций внутри потока. Помсет считается последовательно-согласованным, если существует хотя бы одна такая линеаризация, принадлежащая языку структуры данных.

Рассмотрим помсет (рис. 5), который задает программный порядок, соответствующий программе, приведенной на рис. 1. Видно, что последовательность меток, показанная на рис. 1, является линеаризацией данного помсета — последовательность упорядочена согласно отношению программного порядка. Данная последовательность меток является корректной с точки зрения абстракции разделяемой памяти. Следовательно, приведенный помсет — последовательно согласован.

Выполним формализацию в системе Coq понятия системы помеченных переходов, языков помсетов и их взаимосвязь. Полученная в результате библиотека позволяет специфицировать модели памяти, которые выражаются с помощью линеаризации языков помсетов. Приведем технические детали реализации библиотеки и примеры спецификаций моделей памяти, формализованных с ее помощью.

### Формализация языков помсетов в Coq

Несмотря на относительно простое определение языков помсетов, их формализация в системе Coq не так тривиальна. Проблема заключается в особенностях представления фактор-множеств в интенсиональных теориях типов [36], к которым относится и теория типов, лежащая в основе Coq. В системе Coq существует два подхода к формализации фактор-множеств: с применением *сетоидов* [37] и с помощью *фактор-типов* [38].

Сетоид — тип, оснащенный отношением эквивалентности. В системе Coq реализована поддержка переписывания термов сетоид-типа по отношению эквивалентности. Недостаток подхода — переписывание по отношению эквивалентности работает существенно медленнее, чем по встроенному пропозициональному равенству [39], что приводит к замедлению времени проверки доказательств.

Фактор-тип — такой тип, в котором каждый населяющий его терм соответствует единственному классу эквивалентности, и, наоборот, каждому классу эквивалентности соответствует некоторый терм фактор-типа. Преимущество использования фактор-типов — задача переписывания по отношению эквивалентности может быть сведена к задаче переписывания по пропозициональному равенству на соответствующем фактор-типе. Таким образом, можно обойти проблему производительности переписывания по отношению эквивалентности.

К сожалению, в интенсиональных теориях типов невозможно в общем случае построить фактор-тип для заданного отношения эквивалентности. Обойти это ограничение можно, добавив в систему аксиомы, необходимые для построения фактор-типа, но это приведет к потери свойства *каноничности*. Последнее означает, что все замкнутые термы могут быть редуцированы к нормальной форме.

В работе [29] представлена библиотека (часть библиотеки MathComp), позволяющая в некоторых частных случаях построить фактор-тип без добавления в систему новых аксиом. Опишем ограничения, необходимые для конструктивного построения фактор-типов, и способ авторов настоящей работы кодировки помеченных отношений частичного порядка, который позволяет удовлетворить этим ограничениям и таким образом построить фактор-тип, соответствующий помсетам.

**Конструктивные фактор типы.** Рассмотрим тип `T` и отношение эквивалентности на этом типе `equiv`, по которому требуется построить фактор-тип. Для конструктивного построения фактор-типа необходимо выполнение следующих условий.

— Тип `T` должен быть оснащен *оператором выбора* `xchoose`. Наличие данного оператора позволяет построить терм, обладающий заданным свойством, имея доказательство существования такого терма. Другими словами, данный оператор имеет следующий тип `exists x : T, P x -> T`. Заметим, что Coq основан на интуиционистской [36], а не классической логике, поэтому оператор `xchoose` не может быть определен для произвольного типа без использования дополнительных аксиом.
— Отношение эквивалентности `equiv` должно быть разрешимо, т. е. оно должно иметь тип `T -> T -> bool`.

Таким образом, чтобы закодировать помсеты с помощью фактор-типов, необходимо сначала закодировать все возможные помеченные частично упорядоченные множества типом с оператором выбора, а отношение изоморфизма — разрешимым отношением. Для выполнения условия необходимо наложить существенное ограничение и рассмотреть только конечные отношения частичного порядка.

**Кодирование помсетов.** Для кодирования помеченных отношений частичного порядка использован тип функций с конечным носителем $A \underset{fin}{\rightarrow} B$ из библиотеки MathComp. Функция $f\colon A \underset{fin}{\rightarrow} B$ отображает все элементы вне конечного носителя $\mathcal{A} \subseteq A$ на некоторое значение по умолчанию $b \in B$: $\notin \mathcal{A} \Rightarrow f(a) = b$. Тип функций $A \underset{fin}{\rightarrow} B$ уже оснащен оператором выбора (при условии, что типы $A$ и $B$ также оснащены оператором выбора). Таким образом, использование этих функций для представления помеченных частично упорядоченных множеств позволяет удовлетворить первое ограничение на построение конструктивных фактор-типов.

Конечное отношение частичного порядка кодируется с помощью функции с конечным носителем следую-

щим образом. Для отношения частичного порядка $\leq$ его покрытие $\lessdot$ определяется как: $x \lessdot y \triangleq x < y \wedge \nexists z. x < z < y$. Отношение $R$ называется *префикс-конечным*, если для любого $x$ множество $\{y | (y, x) \in R\}$ конечно. Префикс-конечное отношение $R \subseteq X \times X$ можно представить с помощью функции $f : X \underset{fin}{\rightarrow} \mathcal{P}(X)$, такой, что $y \in f(x) \Leftrightarrow$ $\Leftrightarrow (y, x) \in R$. Для конечного отношения частичного порядка его покрытие является префикс-конечным, и, следовательно, может быть представлено с помощью подобной функции. Такое представление также оказывается удобно при кодировании операционной семантики для построения частично упорядоченного множества путем добавления нового события на каждом шаге.

Более детально, для представления частично упорядоченного множества используется функция $f : E \underset{fin}{\rightarrow} L \times \mathcal{P}(E)$. Данная функция ставит в соответствие событию $e$ пару $(l, \mathfrak{E})$, где $l$ — метка, а $\mathfrak{E} \subseteq E$ — конечное множество непосредственных предков события $e$. Все элементы вне носителя функции отображаются в значение по умолчанию, которое является парой $(\bot, \emptyset)$, где $\bot$ является выделенной меткой, обозначающей неопределенный элемент. На функцию $f$ накладывается дополнительное ограничение: отношение, индуцируемое данной функцией, должно быть ацикличным. Таким образом, гарантируется, что рефлексивно-транзитивное замыкание этого отношения действительно является отношением частичного порядка.

Обозначим как *lposet E L* тип, кодирующий помеченные частично упорядоченные множества с типом $E$ и типом меток $L$ описанным выше способом. Рассмотрим два отношения частичного порядка — $p$, $q$ : *lposet E L* и функцию $h$: $E \rightarrow E$. Так как $p$ и $q$ конечны, то можно определить разрешимый предикат, который проверяет, что функция $h$ удовлетворяет свойствам изоморфизма. Более того, доказывается, что существует только конечное число изоморфизмов между парой $p$ и $q$. Таким образом, с помощью квантора существования по конечному множеству можно проверить, существует ли изоморфизм между $p$ и $q$ — построить разрешимое отношение изоморфизма $\cong$. Это позволяет удовлетворить второе ограничение на построение конструктивных фактор-типов. Наконец, тип помсетов *pomset E L* определяется взятием фактор-типа по отношению изоморфизма $\cong$.

Чтобы формализовать взаимосвязь языков помсетов с системами помеченных переходов, также определяется множество линеаризаций языка помсетов. Для этого вводится отношение поглощения $p \sqsubseteq q$ на помсетах. Доказывается, что данное отношение образует частичный порядок. Заметим, что это доказательство существенно опирается на два следующих факта. Во-первых, помсеты конечны (в противном случае, $p \sqsubseteq q$ и $q \sqsubseteq p$ не влечет $p \cong q$. Во-вторых, отношение поглощения задано на типе помсетов *pomset E L*, а не типе отношений частичного порядка *lposet E L* (иначе $p \cong q$ не влечет $p = q$). При кодировании в Coq линеаризации представляются как списки меток, что позволяет сразу использовать их в контексте систем переходов и последовательных языков. Затем множества линеаризаций помсета и языка помсетов задаются как предикаты на списках меток типа $L$ при помощи отношения поглощения.

Таким образом, с помощью формализации взаимосвязи языков помсетов и операционных семантик в дальнейшем становится возможным задать спецификацию модели памяти в терминах линеаризаций помсетов.

**Ограничения.** Как уже упоминалось, на данный момент предложенная библиотека поддерживает только конечные помсеты. Тем не менее заметим, что параллельная семантика программы все еще может быть выражена как бесконечное множество (язык) конечных помсетов, аналогично тому, как в последовательном случае семантика может быть выражена бесконечным языком конечных слов. Кроме того, использование конечных помсетов достаточно для доказательства *свойств безопасности* программы (*safety properties*) [40]. Тем не менее, иногда бывает нужно также рассматривать бесконечные помсеты, например, для доказательства *свойств живучести* программы (*liveness properties*) [41].

Обойти ограничение на конечность помсетов можно ценой потери каноничности, с помощью добавления в систему новых аксиом. В частности, можно воспользоваться библиотекой MathComp-Analysis [42], предоставляющей некоторые леммы для работы с классической логикой в Coq. Данная библиотека добавляет в систему несколько аксиом классической логики, в том числе:

— *аксиому конструктивного неопределенного описания* (*constructive indefinite description*), которая позволяет построить терм, обладающий заданным свойством, имея доказательство существования такого терма; другими словами, данная аксиома позволяет оснастить произвольный тип оператором выбора `exists x : T, P x -> T`;
— *аксиому пропозициональной экстенсиональности*, которая позволяет вывести равенство двух утверждений из доказательства их эквивалентности. Более формально данная аксиома имеет тип `forall (P Q : Prop), (P <-> Q)-> P = Q`.

По теореме Диаконеску [43] эти две аксиомы влекут *закон исключенного третьего в информативной форме* (*excluded middle informative*), который имеет тип `forall (P : Prop), {P} + ~{P}`. С помощью этого закона по любому отношению можно построить его разрешимый аналог.

Таким образом, используя данные законы классической логики, тип бесконечных помеченных отношений частичного порядка можно оснастить оператором выбора и задать на нем разрешимое отношение изоморфизма, а затем построить фактор-тип для представления бесконечных помсетов.

### Спецификация моделей памяти

Модель памяти задает семантику многопоточных программ, оперирующих с разделяемой структурой данных. Поведение разделяемой структуры данных и отдельных потоков часто задается «последовательной» семантикой [10, 11], в терминах помеченных систем переходов. Определение модели памяти в терминах языков помсетов, таким образом, связывает язык помсетов с «последовательными» системами переходов

структуры данных и отдельных потоков при помощи понятия линеаризации помсетов.

Формализация языков помсетов и их взаимосвязи с системами переходов в рамках предложенной библиотеки позволяет специфицировать в Coq модели памяти в таком стиле. Чтобы продемонстрировать применимость библиотеки для решения данной задачи, приведем примеры спецификаций нескольких моделей памяти, а именно модели *последовательной согласованности*, *причинной согласованности* и *конвейерной согласованности*. Данные модели определены согласно работе [10].

**Спецификация структуры данных.** Последовательная спецификации типа данных задается как помеченная система переходов $\Sigma_D = (S_D, L, \underset{D}{\rightarrow})$ с выделенным начальным состоянием $d_0 \in S_D$. Для спецификации «строгих» моделей, например модели последовательной согласованности, достаточно задать только систему переходов и начальное состояние. Более слабые модели (модель причинной согласованности), по-разному трактуют операции записи и чтения в структуре данных, поэтому для спецификации этих моделей необходимо задать дополнительные ограничения на структуру данных.

Существуют различные способы формально определить операции записи и чтения в структуре данных [10, 11, 35]. Допустим, что на множестве меток задана *структура коммуникации*, которая моделирует передачу информации в структуре данных и позволяет вывести определение подмножества операций записи и операций чтения. Данная структура задается отношением $\Lambda \vdash l$, где $\Lambda \subseteq L$ и $l \in L$. Будем говорить, что помсет $p$ *уважает отношение коммуникации*, $p \in \mathrm{COM}(L)$, если выполняется следующее условие:

$$\forall e.\, \exists e_1 \ldots e_n.\, \{\lambda(e_1), \ldots, \lambda(e_n)\} \vdash \lambda(e) \wedge \forall i. e_i \leq e.$$

Данное условие гарантирует, что появление в помсете $p$ события $e$ с меткой $\lambda(e)$ должно быть обосновано наличием предшествующих $e$ событий $e_1 \ldots e_n$ с метками $\lambda(e_1), \ldots, \lambda(e_n)$ находящимися в отношении коммуникации с $\lambda(e)$.

Предположим, что язык системы переходов $Lang(\Sigma_D, s_0)$ уважает отношение коммуникации.

Метка $w \in L$ считается операцией записи $w \in W$, если существуют метки $\Lambda \subseteq L$ и метка $r \in L$, такие что $w \in \Lambda$ и $\Lambda \vdash r$. Метка $r \in L$ считается операцией чтения $r \in R$, если существуют метки $\Lambda \subseteq L$, такие что $\Lambda \vdash r$. Частично определенная функция к возвращает тип метки:

$$\kappa(l) = \begin{cases} R, l \in R \backslash W \\ W, l \in W \backslash R \\ RW, l \in W \cap R \\ \bot, \text{иначе.} \end{cases}$$

Примем, что на метках задано отношение конфликта #. Положим, что неконфликтующие метки коммутируют, т. е. для любой пары $a, b \in L$, такой что $\neg(a \# b)$, и для любых строк $u, v \in L^*$ справедливо следующее:

$$uabv \in Lang(\Sigma_D, d_0) \Leftrightarrow ubav \in Lang\,(\Sigma_D, d_0).$$

Например, рассмотрим спецификацию разделямой памяти — базового типа данных, для которого традиционно задаются модели памяти. Система переходов выглядит следующим образом:

$$\frac{m' = m[x \mapsto v]}{m \xrightarrow{W_x v} m'}\,(Write)\ \frac{m(x) = v}{m \xrightarrow{R_x v} m}\,(Read).$$

Состояние системы переходов — отображение из адреса переменной в ее значение, которое моделируется функцией с конечным носителем $m$: $\mathcal{A} \underset{fin}{\rightarrow} \mathcal{V}$. Отношение коммуникации (часто называемое «читает-из») и отношение конфликта заданы по следующим правилам:

$$\overline{\{W_x v\} \vdash R_x v} \quad \overline{W_x v_1 \# W_x v_2} \quad \overline{W_x v_1 \# R_x v_2}.$$

**Программный порядок.** Для того чтобы моделировать потоки параллельной программы, во-первых, полагается, что спецификация потоков также задана как система помеченных переходов над тем же множеством меток, что и у спецификации структуры данных $\Sigma_T = (S_T, L, \underset{T}{\rightarrow})$. Во-вторых, множество меток дополнительно индексируется множеством идентификаторов потоков $T$, т. е. пара $(t, l)$ обозначает, что поток $t \in T$ выполняет операцию с меткой $l$. Рассмотрим помсет $p$ над множеством меток $T \times L$: $p \in Pomset_L$. Обозначим как $\tau$ и $\lambda$ функции, возвращающие идентификатор потока и метку операции соответственно.

На помсете $p$ можно задать отношение эквивалентности, связывающее события из одного потока: $e_1 =_\tau e_2 \triangleq \tau(e_1) = \tau(e_2)$. Пересечение отношений частичного порядка $p$ и $=_\tau$ образует частичный порядок, и, следовательно, помсет. Этот порядок называется *программным порядком*, соответствующий помсет обозначим как $po(p)$. Пусть $t \in T$ — идентификатор потока. Тогда можно рассмотреть сужение помсета $p$ на класс эквивалентности $t$ по отношению $=_\tau$, обозначим его как $p_t$. Этот помсет соответствует потоку с идентификатором $t$. Для всех рассматриваемых далее моделей потребуем, чтобы для каждого $t$ помсет $p_t$ принадлежал языку $\Sigma_T$ для некоторого начального состояния $s_0 \in S_T$:

$$\forall t \in T.\, \exists s_0 \in \Sigma_T.\, p_t \in Lang(\Sigma_T, s_0).$$

Заметим, что это влечет к тому, что $p_t$ должен быть полностью упорядочен. Это свойство позволяет связать помсет с последовательной семантикой, задающей поведение потоков.

**Модель последовательной согласованности** предписывает, что результат каждого сценария исполнения программы мог быть объяснен как результат поочередного выполнения инструкций потоков. Другими словами, для каждого сценария исполнения программы должен существовать способ полностью упорядочить события данного сценария, сохраняя программный порядок.

Обозначим как $SegCst(\Sigma_D, d_0)$ язык помсетов, которые являются последовательно согласованными относительно структуры данных $\Sigma_D$ с начальным со-

стоянием $d_0$. Помсет $p$ является *последовательно согласованным*, если выполняется следующее условие:

$$p \in SegCst(\Sigma_D, d_0) \triangleq \{po(p)\} \hookrightarrow Lang(\Sigma_D, d_0).$$

**Модель причинной согласованности** определяется более сложным образом с помощью порядка «происходит-до» (happens-before), который должен включать программный порядок. Требуется, чтобы все потоки наблюдали операции записи, упорядоченные отношением «происходит-до», согласно этому порядку. В рамках модели последовательной согласованности каждое событие обладает знанием только о предшествующих событиях из своего потока, а также о предшествующих операциях записи из других потоков.

Чтобы формализовать определение причинной согласованности, введем понятие префикса события и перемаркировки помсета. Ограничение помсета на префикс события позволяет рассматривать только те события, которые происходили до данного события. Перемаркировка помсета позволяет изменить метки операций чтения в других потоках, чтобы отразить тот факт, что поток обладает знанием только об операциях записи.

Префикс события $e$ относительно помсета $p$ это множество $\lceil e \rceil \triangleq \{e' | e' \leq e\}$. Запись $p_{\lceil e \rceil}$ обозначает сужение $p$ на префикс события $e$. Пусть $f\colon L \to L$ это функция на метках. Тогда перемаркировка помсета $p$ определяется как $f(p) \triangleq (E_p, \tau, f \circ \lambda, \leq_p)$. Будем говорить, что функция $f\colon L \to L$ обладает следующими свойствами:

— *сохраняет тип операций*, если $\kappa_{f(p)}(e) = \kappa_p(e)$;
— *сохраняет отношение конфликта*, если $e_1 \#_{f(p)} e_2 \Leftrightarrow$ $\Leftrightarrow e_1 \#_p e_2$;
— *сохраняет метки по модулю подмножества событий* $\mathcal{E}$, если $e \notin \mathcal{E}$ влечет $\lambda_{f(p)}(e) = \lambda_p(e)$.

Обозначим как $Relab(\mathcal{E})$ множество функций, которые удовлетворяют всем этим условиям относительно подмножества событий $\mathcal{E}$. Для потока $t \in T$ обозначим как $R_p^{\neq t}$ множество операций чтений, принадлежащих другим потокам:

$$R_p^{\neq t} \triangleq \{e \in E_p | \tau(e) \neq t \wedge \kappa(e) = R\}.$$

Определим посредством $HB(\Sigma_D, d_0)$ язык помсетов, который содержит все возможные варианты отношения «происходит-до» относительно структуры данных $\Sigma_D$ и начального состояния $d_0$. Помсет $q$ принадлежит этому языку, если для каждого события $e \in E_q$ сужение помсета $q$ на префикс события $e$ может быть линеаризировано к последовательности, принадлежащей языку структуры данных, по модулю перемаркировки некоторых операций чтения из других потоков:

$$q \in HB(\Sigma_D, d_0) \triangleq \forall e \in E_q.\ \exists f \in Relab(R_p^{\neq \tau(e)}).$$
$$\{f(q_{\lceil e \rceil})\} \hookrightarrow Lang(\Sigma_D, d_0).$$

Помсет $p$ является *причинно-согласованным*, если существует $q \in HB(\Sigma_D, d_0)$, такой что $q \sqsubseteq po(p)$:

$$p \in CausalCst(\Sigma_D, d_0) \triangleq \{po(p)\} \hookrightarrow HB(\Sigma_D, d_0).$$

**Модель конвейерной согласованности** ослабляет модель последовательной согласованности. Требуется, чтобы все потоки наблюдали в одинаковом порядке только те операции записи, которые упорядочены отношением программного порядка (а не отношением «происходит-до»).

Помсет $p$ является *конвейерно-согласованным*, если для каждого потока существует линеаризация программного порядка, принадлежащей языку структуры данных, по модулю перемаркировки некоторых операций чтения из других потоков:

$$p \in PipeCst(\Sigma_D, d_0) \triangleq \forall t \in T.\ \exists f \in Relab(R_p^{\neq t}).$$
$$\{f(po(p))\} \hookrightarrow Lang(\Sigma_D, d_0).$$

**Выводы и ограничения.** При помощи разработанной библиотеки были формализованы три базовые модели консистентности. Кроме перечисленных выше моделей памяти, ожидается, что другие модели, которые выражаются в терминах линеаризаций помсетов и сохраняют программный порядок [1], также могут быть формализованы с помощью разработанной библиотеки. Этот класс моделей включает в том числе различные варианты *модели последовательной согласованности* (*causal consistency*) [10] и *модели согласованности в конечном счете* (*eventual consistency*) [11].

Отметим, что не все структуры данных могут иметь последовательную спецификацию. В качестве примера в работе [35] приведена структура обменника (exchanger), которая позволяет двум потокам атомарно обменяться парой значений. На данный момент подобные структуры данных не могут быть специфицированы с помощью библиотеки.

Кроме того, не все модели сохраняют программный порядок [9]. К таким моделям относятся модели памяти некоторых процессоров, например ARMv8 [3], и некоторые продвинутые модели для языков программирования, например модель Weaksetmo [22] и модель PwP [23]. В будущем будет интересно расширить библиотеку, чтобы также покрыть более широкий класс моделей.

## Связанные работы

Спецификации моделей памяти, параметризованные операционной семантикой структуры данных, были представлены в работах [10, 11, 44]. Ни одна из этих работ не рассматривает задачу формализации данных модели памяти в системах доказательства теорем.

В работе [35] авторы представили метод для формализации моделей памяти и параллельных структур данных, и верифицировали некоторые спецификации в системе Coq. В этой работе также, как и в разработанной в настоящей работе библиотеке, поддерживаются только модели, сохраняющие программный порядок. Представленный метод основан на использовании *множеств графов сценариев исполнения* как семантического домена. Семантика структуры данных задается как набор ограничений на множество графов. Достоинством данного метода является то, что он позволяет формализовать структуры данных, которые не имеют последовательной спецификации, например, структуры обменника (exchanger). Отличие предложенной в настоящей работе библиотеки — взаимосвязь

спецификаций в терминах графов и операционных семантик не формализуются.

В работе для спецификации моделей памяти используется домен языков помсетов, что позволяет применить известные теоретические результаты [17, 18, 28] к определениям моделей памяти. Также, по мнению авторов, в данной работе впервые реализован метод представления помсетов на основе использования конструктивных фактор-типов.

## Заключение

В работе представлен метод кодирования семантического домена языков конечных помсетов с использованием конструктивных фактор-типов и библиотека для системы Coq, реализующая данный метод. Использование фактор-типов позволяет в доказательствах проводить рассуждения по модулю изоморфизма помсетов, не прибегая к использованию сетоидов. Ограничение на конечность помсетов позволяет оставаться в рамках конструктивной логики и не прибегать к использованию аксиом классической логики.

Библиотека может быть использована для формализации и доказательства свойств семантики параллельных и распределенных систем и языков программирования. В частности, в качестве примера были формализованы модели памяти последовательной, причинной и конвейерной согласованности.

В будущем планируется добавить поддержку бесконечных помсетов, а также расширить библиотеку, добавив формализацию других моделей «истинной конкурентности» и установив взаимосвязи между ними.

## Литература


1. Moiseenko E., Podkopaev A., Koznov D. A survey of programming language memory models // Programming and Computer Software. 2021. V. 47. N 6. P. 439–456. https://doi.org/10.1134/S0361768821060050
2. Sewell P., Sarkar S., Owens S., Nardelli F.Z., Myreen M.O. x86-TSO: A rigorous and usable programmer's model for x86 multiprocessors // Communications of the ACM. 2010. V. 53. N 7. P. 89–97. https://doi.org/10.1145/1785414.1785443
3. Sarkar S., Sewell P., Alglave J., Maranget L., Williams D. Understanding POWER multiprocessors // Proc. of the 32nd ACM SIGPLAN Conference on Programming Language Design and Implementation. 2011. P. 175–186. https://doi.org/10.1145/1993316.1993520
4. Pulte C., Flur S., Deacon W., French J., Sarkar S., Sewell P. Simplifying ARM concurrency: multicopy-atomic axiomatic and operational models for ARMv8 // Proceedings of the ACM on Programming Languages. 2018. V. 2. P. 19. https://doi.org/10.1145/3158107
5. Batty M., Owens S., Sarkar S., Sewell P., Weber T. Mathematizing C++ concurrency // ACM SIGPLAN Notices. 2011. V. 46. N 1. P. 55–66. https://doi.org/10.1145/1925844.1926394
6. Manson J., Pugh W., Adve S.V. The Java memory model // ACM SIGPLAN Notices. 2005. V. 40. N 1. P. 378–391. https://doi.org/10.1145/1047659.1040336
7. Bender J., Palsberg J. A formalization of Java's concurrent access modes // Proceedings of the ACM on Programming Languages. 2019. V. 3. N OOPSLA. P. A142. https://doi.org/10.1145/3360568
8. Chakraborty S., Vafeiadis V. Formalizing the concurrency semantics of an LLVM fragment // Proc.of the IEEE/ACM International Symposium on Code Generation and Optimization (CGO). 2017. P. 100–110. https://doi.org/10.1109/CGO.2017.7863732
9. Watt C., Pulte C., Podkopaev A., Barbier G., Dolan S., Flur S., Pichon-Pharabod J., Guo S.-Y. Repairing and mechanising the JavaScript relaxed memory model // Proc. of the 41st ACM SIGPLAN Conference on Programming Language Design and Implementation (PLDI). 2020. P. 346–361. https://doi.org/10.1145/3385412.3385973
10. Perrin M., Mostéfaoui A., Jard C. Causal consistency: beyond memory // Proc. of the 21st ACM SIGPLAN Symposium on Principles and Practice of Parallel Programming (PPoPP). 2016. P. 26. https://doi.org/10.1145/2851141.2851170
11. Jagadeesan R., Riely J. Eventual consistency for CRDTs // Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). 2018. V. 10801. P. 968–995. https://doi.org/10.1007/978-3-319-89884-1_34
12. Anceaume E., Del Pozzo A., Ludinard R., Potop-Butucaru M., Tucci-Piergiovanni S. Blockchain abstract data type // Proc. of the 31st ACM Symposium on Parallelism in Algorithms and Architectures. 2019. P. 349–358. https://doi.org/10.1145/3323165.3323183
13. Batty M., Memarian K., Nienhuis K., Pichon-Pharabod J., Sewell P. The problem of programming language concurrency semantics // Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture


## References


1. Moiseenko E., Podkopaev A., Koznov D. A survey of programming language memory models. *Programming and Computer Software*, 2021, vol. 47, no. 6, pp. 439–456. https://doi.org/10.1134/S0361768821060050
2. Sewell P., Sarkar S., Owens S., Nardelli F.Z., Myreen M.O. x86-TSO: A rigorous and usable programmer's model for x86 multiprocessors. *Communications of the ACM*, 2010, vol. 53, no. 7, pp. 89–97. https://doi.org/10.1145/1785414.1785443
3. Sarkar S., Sewell P., Alglave J., Maranget L., Williams D. Understanding POWER multiprocessors. *Proc. of the 32nd ACM SIGPLAN Conference on Programming Language Design and Implementation*, 2011, pp. 175–186. https://doi.org/10.1145/1993316.1993520
4. Pulte C., Flur S., Deacon W., French J., Sarkar S., Sewell P. Simplifying ARM concurrency: multicopy-atomic axiomatic and operational models for ARMv8. *Proceedings of the ACM on Programming Languages*, 2018, vol. 2, pp. 19. https://doi.org/10.1145/3158107
5. Batty M., Owens S., Sarkar S., Sewell P., Weber T. Mathematizing C++ concurrency. *ACM SIGPLAN Notices*, 2011, vol. 46, no. 1, pp. 55–66. https://doi.org/10.1145/1925844.1926394
6. Manson J., Pugh W., Adve S.V. The Java memory model. *ACM SIGPLAN Notices*, 2005, vol. 40, no. 1, pp. 378–391. https://doi.org/10.1145/1047659.1040336
7. Bender J., Palsberg J. A formalization of Java's concurrent access modes. *Proceedings of the ACM on Programming Languages*, 2019, vol. 3, no. OOPSLA, pp. A142. https://doi.org/10.1145/3360568
8. Chakraborty S., Vafeiadis V. Formalizing the concurrency semantics of an LLVM fragment. *Proc.of the IEEE/ACM International Symposium on Code Generation and Optimization (CGO)*, 2017, pp. 100–110. https://doi.org/10.1109/CGO.2017.7863732
9. Watt C., Pulte C., Podkopaev A., Barbier G., Dolan S., Flur S., Pichon-Pharabod J., Guo S.-Y. Repairing and mechanising the JavaScript relaxed memory model. *Proc. of the 41st ACM SIGPLAN Conference on Programming Language Design and Implementation (PLDI)*, 2020, pp. 346–361. https://doi.org/10.1145/3385412.3385973
10. Perrin M., Mostéfaoui A., Jard C. Causal consistency: beyond memory. *Proc. of the 21st ACM SIGPLAN Symposium on Principles and Practice of Parallel Programming (PPoPP)*, 2016, pp. 26. https://doi.org/10.1145/2851141.2851170
11. Jagadeesan R., Riely J. Eventual consistency for CRDTs. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 2018, vol. 10801, pp. 968–995. https://doi.org/10.1007/978-3-319-89884-1_34
12. Anceaume E., Del Pozzo A., Ludinard R., Potop-Butucaru M., Tucci-Piergiovanni S. Blockchain abstract data type. *Proc. of the 31st ACM Symposium on Parallelism in Algorithms and Architectures*, 2019, pp. 349–358. https://doi.org/10.1145/3323165.3323183
13. Batty M., Memarian K., Nienhuis K., Pichon-Pharabod J., Sewell P. The problem of programming language concurrency semantics.

Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). 2015. V. 9032. P. 283–307. https://doi.org/10.1007/978-3-662-46669-8_12
14. Lahav O., Vafeiadis V., Kang J., Hur C.-K., Dreyer D. Repairing Sequential Consistency in C/C++11 // ACM SIGPLAN Notices. 2017. V. 52. N 6. P. 618–632. https://doi.org/10.1145/3062341.3062352
15. Gonthier G. Formal proof — the four-color theorem // Notices of the AMS. 2008. V. 55. N 11. P. 1382–1393.
16. Leroy X. A formally verified compiler back-end // Journal of Automated Reasoning. 2009. V. 43. N 4. P. 363–446. https://doi.org/10.1007/s10817-009-9155-4
17. Pratt V. The pomset model of parallel processes: Unifying the temporal and the spatial // Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). 1985. V. 197. P. 180–196. https://doi.org/10.1007/3-540-15670-4_9
18. Gischer J.L. The equational theory of pomsets // Theoretical Computer Science. 1988. V. 61. N 2-3. P. 199–224. https://doi.org/10.1016/0304-3975(88)90124-7
19. Mazurkiewicz A. Trace theory // Advances in Petri nets 1986, part II on Petri nets: applications and relationships to other models of concurrency. Springer, 1986. P. 278–324.
20. Winskel G. Event structures // Advances in Petri nets 1986, part II on Petri nets: applications and relationships to other models of concurrency. Springer, 1986. P. 325–392.
21. Peterson J.L. Petri nets // ACM Computing Surveys. 1977. V. 9. N 3. P. 223–252. https://doi.org/10.1145/356698.356702
22. Chakraborty S., Vafeiadis V. Grounding thin-air reads with event structures // Proceedings of the ACM on Programming Languages. 2019. V. 3. N POPL. P. 70. https://doi.org/10.1145/3290383
23. Jagadeesan R., Jeffrey A., Riely J. Pomsets with preconditions: a simple model of relaxed memory // Proceedings of the ACM on Programming Languages. 2020. V. 4. N OOPSLA. P. 194. https://doi.org/10.1145/3428262
24. Abdulla P., Aronis S., Jonsson B., Sagonas K. Optimal dynamic partial order reduction // Proc. of the 41st Annual ACM SIGPLAN-SIGACT Symposium on Principles of Programming Languages (POPL). 2014. P. 373–384. https://doi.org/10.1145/2535838.2535845
25. Kokologiannakis M., Lahav O., Sagonas K., Vafeiadis V. Effective stateless model checking for C/C++ concurrency // Proceedings of the ACM on Programming Languages. 2017. V. 2. N POPL. P. 17. https://doi.org/10.1145/3158105
26. Nielsen M., Sassone V., Winskel G. Relationships between models of concurrency // Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). 1994. V. 803. P. 425–476. https://doi.org/10.1007/3-540-58043-3_25
27. Vaandrager F.W. Determinism → (event structure isomorphism = step sequence equivalence) // Theoretical Computer Science. 1991. V. 79. N 2. P. 275–294. https://doi.org/10.1016/0304-3975(91)90333-W
28. Sassone V., Nielsen M., Winskel G. Deterministic behavioural models for concurrency // Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). 1993. V. 711. P. 682–692. https://doi.org/10.1007/3-540-57182-5_59
29. Cohen C. Pragmatic quotient types in Coq // Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). 2013. V. 7998. P. 213–228. https://doi.org/10.1007/978-3-642-39634-2_17
30. Gonthier G., Mahboubi A., Tassi E. A small scale reflection extension for the Coq system. Inria Saclay Ile de France, 2016.
31. Aceto L., Fokkink W., Verhoef C. Structural operational semantics // Handbook of Process Algebra. Elsevier, 2001. P. 197–292. https://doi.org/10.1016/B978-044482830-9/50021-7
32. Lamport L. How to make a multiprocessor computer that correctly executes multiprocess programs // IEEE Transactions on Computers. 1979. V. 28. N 9. P. 690–691. https://doi.org/10.1109/TC.1979.1675439
33. Singh A., Narayanasamy S., Marino D., Millstein T., Musuvathi M. End-to-end sequential consistency // Proc. of the 39th Annual International Symposium on Computer Architecture (ISCA). 2012. P. 524–535. https://doi.org/10.1109/ISCA.2012.6237045
34. Fidge C.J. Timestamps in message-passing systems that preserve the partial ordering // Australian Computer Science Communications. 1988. V. 10. N 1. P. 56–66.

*Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 2015, vol. 9032, pp. 283–307. https://doi.org/10.1007/978-3-662-46669-8_12
14. Lahav O., Vafeiadis V., Kang J., Hur C.-K., Dreyer D. Repairing Sequential Consistency in C/C++11. *ACM SIGPLAN Notices*, 2017, vol. 52, no. 6, pp. 618–632. https://doi.org/10.1145/3062341.3062352
15. Gonthier G. Formal proof — the four-color theorem. *Notices of the AMS*, 2008, vol. 55, no. 11, pp. 1382–1393.
16. Leroy X. A formally verified compiler back-end. *Journal of Automated Reasoning*, 2009, vol. 43, no. 4, pp. 363–446. https://doi.org/10.1007/s10817-009-9155-4
17. Pratt V. The pomset model of parallel processes: Unifying the temporal and the spatial. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 1985, vol. 197, pp. 180–196. https://doi.org/10.1007/3-540-15670-4_9
18. Gischer J.L. The equational theory of pomsets. *Theoretical Computer Science*, 1988, vol. 61, no. 2-3, pp. 199–224. https://doi.org/10.1016/0304-3975(88)90124-7
19. Mazurkiewicz A. Trace theory. *Advances in Petri nets 1986, part II on Petri nets: applications and relationships to other models of concurrency*. Springer, 1986, pp. 278–324.
20. Winskel G. Event structures. *Advances in Petri nets 1986, part II on Petri nets: applications and relationships to other models of concurrency*. Springer, 1986, pp. 325–392.
21. Peterson J.L. Petri nets. *ACM Computing Surveys*, 1977, vol. 9, no. 3, pp. 223–252. https://doi.org/10.1145/356698.356702
22. Chakraborty S., Vafeiadis V. Grounding thin-air reads with event structures. *Proceedings of the ACM on Programming Languages*, 2019, vol. 3, no. POPL, pp. 70. https://doi.org/10.1145/3290383
23. Jagadeesan R., Jeffrey A., Riely J. Pomsets with preconditions: a simple model of relaxed memory. *Proceedings of the ACM on Programming Languages*, 2020, vol. 4, no. OOPSLA, pp. 194. https://doi.org/10.1145/3428262
24. Abdulla P., Aronis S., Jonsson B., Sagonas K. Optimal dynamic partial order reduction. *Proc. of the 41st Annual ACM SIGPLAN-SIGACT Symposium on Principles of Programming Languages (POPL)*, 2014, pp. 373–384. https://doi.org/10.1145/2535838.2535845
25. Kokologiannakis M., Lahav O., Sagonas K., Vafeiadis V. Effective stateless model checking for C/C++ concurrency. *Proceedings of the ACM on Programming Languages*, 2017, vol. 2, no. POPL, pp. 17. https://doi.org/10.1145/3158105
26. Nielsen M., Sassone V., Winskel G. Relationships between models of concurrency. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 1994, vol. 803, pp. 425–476. https://doi.org/10.1007/3-540-58043-3_25
27. Vaandrager F.W. Determinism → (event structure isomorphism = step sequence equivalence). *Theoretical Computer Science*, 1991, vol. 79, no. 2, pp. 275–294. https://doi.org/10.1016/0304-3975(91)90333-W
28. Sassone V., Nielsen M., Winskel G. Deterministic behavioural models for concurrency. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 1993, vol. 711, pp. 682–692. https://doi.org/10.1007/3-540-57182-5_59
29. Cohen C. Pragmatic quotient types in Coq. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 2013, vol. 7998, pp. 213–228. https://doi.org/10.1007/978-3-642-39634-2_17
30. Gonthier G., Mahboubi A., Tassi E. *A small scale reflection extension for the Coq system*. Inria Saclay Ile de France, 2016.
31. Aceto L., Fokkink W., Verhoef C. Structural operational semantics. *Handbook of Process Algebra*. Elsevier, 2001, pp. 197–292. https://doi.org/10.1016/B978-044482830-9/50021-7
32. Lamport L. How to make a multiprocessor computer that correctly executes multiprocess programs. *IEEE Transactions on Computers*, 1979, vol. 28, no. 9, pp. 690–691. https://doi.org/10.1109/TC.1979.1675439
33. Singh A., Narayanasamy S., Marino D., Millstein T., Musuvathi M. End-to-end sequential consistency. *Proc. of the 39th Annual International Symposium on Computer Architecture (ISCA)*, 2012, pp. 524–535. https://doi.org/10.1109/ISCA.2012.6237045
34. Fidge C.J. Timestamps in message-passing systems that preserve the partial ordering. *Australian Computer Science Communications*, 1988, vol. 10, no. 1, pp. 56–66.

35. Raad A., Doko M., Rožić L., Lahav O., Vafeiadis V. On library correctness under weak memory consistency: specifying and verifying concurrent libraries under declarative consistency models // Proceedings of the ACM on Programming Languages. 2019. V. 3. N POPL. P. 68. https://doi.org/10.1145/3290381
36. Martin-Löf P., Sambin G. Intuitionistic Type Theory. V. 9. Bibliopolis, 1984.
37. Barthe G., Capretta V., Pons O. Setoids in type theory // Journal of Functional Programming. 2003. V. 13. N 2. P. 261–293. https://doi.org/10.1017/S0956796802004501
38. Chicli L., Pottier L., Simpson C. Mathematical quotients and quotient types in Coq // Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). 2003. V. 2646. P. 95–107. https://doi.org/10.1007/3-540-39185-1_6
39. Gross J.S. Performance Engineering of Proof-Based Software Systems at Scale: Ph. D. thesis / Massachusetts Institute of Technology. 2021.
40. Lamport L. Proving the correctness of multiprocess programs // IEEE Transactions on Software Engineering. 1977. V. SE-3. N 2. P. 125–143. https://doi.org/10.1109/TSE.1977.229904
41. Lahav O., Namakonov E., Oberhauser J., Podkopaev A., Vafeiadis V. Making weak memory models fair // Proceedings of the ACM on Programming Languages. 2021. V. 5. N OOPSLA. P. 98. https://doi.org/10.1145/3485475
42. Affeldt R., Cohen C., Rouhling D. Formalization techniques for asymptotic reasoning in classical analysis // Journal of Formalized Reasoning. 2018. V. 11. N 1. P. 43–76. https://doi.org/10.6092/issn.1972-5787/8124
43. Diaconescu R. Axiom of choice and complementation // Proceedings of the American Mathematical Society. 1975. V. 51. N 1. P. 176–178. https://doi.org/10.1090/S0002-9939-1975-0373893-X
44. Doherty S., Dongol B., Wehrheim H., Derrick J. Making linearizability compositional for partially ordered executions // Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). 2018. V. 11023. P. 110–129. https://doi.org/10.1007/978-3-319-98938-9_7

35. Raad A., Doko M., Rožić L., Lahav O., Vafeiadis V. On library correctness under weak memory consistency: specifying and verifying concurrent libraries under declarative consistency models. *Proceedings of the ACM on Programming Languages*, 2019, vol. 3, no. POPL, pp. 68. https://doi.org/10.1145/3290381
36. Martin-Löf P., Sambin G. *Intuitionistic Type Theory*. V. 9. Bibliopolis, 1984.
37. Barthe G., Capretta V., Pons O. Setoids in type theory. *Journal of Functional Programming*, 2003, vol. 13, no. 2, pp. 261–293. https://doi.org/10.1017/S0956796802004501
38. Chicli L., Pottier L., Simpson C. Mathematical quotients and quotient types in Coq. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 2003, vol. 2646, pp. 95–107. https://doi.org/10.1007/3-540-39185-1_6
39. Gross J.S. *Performance Engineering of Proof-Based Software Systems at Scale*. Ph. D. thesis. Massachusetts Institute of Technology, 2021.
40. Lamport L. Proving the correctness of multiprocess programs. *IEEE Transactions on Software Engineering*, 1977, vol. SE-3, no. 2, pp. 125–143. https://doi.org/10.1109/TSE.1977.229904
41. Lahav O., Namakonov E., Oberhauser J., Podkopaev A., Vafeiadis V. Making weak memory models fair. *Proceedings of the ACM on Programming Languages*, 2021, vol. 5, no. OOPSLA, pp. 98. https://doi.org/10.1145/3485475
42. Affeldt R., Cohen C., Rouhling D. Formalization techniques for asymptotic reasoning in classical analysis. *Journal of Formalized Reasoning*, 2018, vol. 11, no. 1, pp. 43–76. https://doi.org/10.6092/issn.1972-5787/8124
43. Diaconescu R. Axiom of choice and complementation. *Proceedings of the American Mathematical Society*, 1975, vol. 51, no. 1, pp. 176–178. https://doi.org/10.1090/S0002-9939-1975-0373893-X
44. Doherty S., Dongol B., Wehrheim H., Derrick J. Making linearizability compositional for partially ordered executions. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 2018, vol. 11023, pp. 110–129. https://doi.org/10.1007/978-3-319-98938-9_7

## Авторы

**Моисеенко Евгений Александрович** — аспирант, Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, 199034, Российская Федерация; исследователь, JetBrains Research, Санкт-Петербург, 194100, Российская Федерация, SC 57219492685, https://orcid.org/0000-0003-2715-1143, e.moiseenko@2012.spbu.ru

**Гладштейн Владимир Петрович** — студент, Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, 199034, Российская Федерация; исследователь, JetBrains Research, Санкт-Петербург, 194100, Российская Федерация, https://orcid.org/0000-0001-9233-3133, vovaglad00@gmail.com

**Подкопаев Антон Викторович** — кандидат наук, доцент, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Санкт-Петербург, 194100, Российская Федерация; исследователь, JetBrains Research, Санкт-Петербург, 194100, Российская Федерация, SC 56875418900, https://orcid.org/0000-0002-9448-6587, apodkopaev@hse.ru

**Кознов Дмитрий Владимирович** — доктор наук, доцент, профессор, Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, 199034, Российская Федерация, SC 8885649400, https://orcid.org/0000-0003-2632-3193, d.koznov@spbu.ru

## Authors

**Evgenii A. Moiseenko** — PhD Student, Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, 199034, Russian Federation; Researcher, JetBrains Research, Saint Petersburg, 194100, Russian Federation, SC 57219492685, https://orcid.org/0000-0003-2715-1143, e.moiseenko@2012.spbu.ru

**Vladimir P. Gladstein** — Student, Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, 199034, Russian Federation; Researcher, JetBrains Research, Saint Petersburg, 194100, Russian Federation, https://orcid.org/0000-0001-9233-3133, vovaglad00@gmail.com

**Anton V. Podkopaev** — PhD, Associate Professor, HSE University, Saint Petersburg, 194100, Russian Federation; Researcher, JetBrains Research, Saint Petersburg, 194100, Russian Federation, SC 56875418900, https://orcid.org/0000-0002-9448-6587, apodkopaev@hse.ru

**Dmitry V. Koznov** — D. Sc., Associate Professor, Professor, Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, 199034, Russian Federation, SC 8885649400 https://orcid.org/0000-0003-2632-3193, d.koznov@spbu.ru

*Статья поступила в редакцию 28.01.2022*
*Одобрена после рецензирования 24.03.2022*
*Принята к печати 15.05.2022*

*Received 28.01.2022*
*Approved after reviewing 24.03.2022*
*Accepted 15.05.2022*

Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ
май–июнь 2022 Том 22 № 3 http://ntv.ifmo.ru/
SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL OF INFORMATION TECHNOLOGIES, MECHANICS AND OPTICS
May–June 2022 Vol. 22 No 3 http://ntv.ifmo.ru/en/
ISSN 2226-1494 (print) ISSN 2500-0373 (online)

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК УНИВЕРСИТЕТ ИТМО
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ

doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-3-528-537

# Cloud-based intelligent monitoring system to implement mask violation detection and alert simulation

**Komal Venugopal Vattumilli[1]✉, Lalith Movva[2], Arun Kumar Thangavelu[3], Jayashree Jayaraman[4], Vijayashree Jayaraman[5]**

[1,2,3,4,5] School of Computer Science and Engineering, Vellore Technological Institute, Vellore, 632014, India

[1] komalvenugopal@gmail.com✉, https://orcid.org/0000-0002-9292-7473
[2] lalithindian@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-1767-3186
[3] arunkumart@vit.ac.in, https://orcid.org/0000-0001-7384-8975
[4] jayashree.j@vit.ac.in, https://orcid.org/0000-0002-0191-8070
[5] vijayashree.j@vit.ac.in, https://orcid.org/0000-0001-6987-3377

**Abstract**

The importance of wearing a mask in public places came to light when the COVID-19 pandemic has started due to the coronavirus. To strictly control the spread of the virus, wearing a mask is mandatory to avoid getting the virus through others or spreading the virus to others if we are carrying it. Since it's not possible to check each individual in public places whether he/she is wearing a mask, this paper proposed a face mask detection using Deep Learning (DL) and Convolutional Neural Network (CNN) techniques. A cloud-based approach that adopted DL is used to identify the persons violating the rules. The dataset used in the work is collected from various studies, such as Prajnasb/observations and Kaggle's Face Mask Detection Dataset that contains images of people wearing and not wearing masks. The faces in the images will be detected and cropped with the help of a trained face detector which will be used for checking whether the face in the image is wearing a mask or not. Face mask detection is done with the help of CNN. The input image is fed into the CNN and the output is binary format, whether person wearing or not wearing a mask. The work uses Max Pooling and Average Pooling layers of CNN. The outcome of the work shows that the proposed method achieves 98 % of accuracy using Max Pooling which is better than the currently available works.

**Keywords**

convolutional neural networks, CNN, PyTorch, deep learning, cloud

**For citation:** Komal Venugopal V., Lalith M., Arun Kumar T., Jayashree J., Vijayashree J. Cloud-based intelligent monitoring system to implement mask violation detection and alert simulation. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2022, vol. 22, no. 3, pp. 528–537. doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-3-528-537

УДК 004.932.2

# Облачная интеллектуальная система мониторинга для обнаружения нарушений ношения маски и выдачи предупреждений

**Ваттумилли Комал Венугопал[1]✉, Моввa Лалит[2], Тангавелу Арун Кумар[3], Джаяраман Джаяшри[4], Джаяраман Виджаяшри[5]**

[1,2,3,4,5] Школа компьютерных наук и инженерии, Технологический институт Веллору, Веллуру, 632014, Индия

[1] komalvenugopal@gmail.com✉, https://orcid.org/0000-0002-9292-7473
[2] lalithindian@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-1767-3186
[3] arunkumart@vit.ac.in, https://orcid.org/0000-0001-7384-8975
[4] jayashree.j@vit.ac.in, https://orcid.org/0000-0002-0191-8070
[5] vijayashree.j@vit.ac.in, https://orcid.org/0000-0001-6987-3377

© Komal Venugopal V., Lalith M., Arun Kumar T., Jayashree J., Vijayashre J., 2022

**Аннотация**

Важность ношения маски в общественных местах стала очевидна, когда из-за коронавируса началась пандемия COVID-19. Для строгого контроля за распространением вируса ношение маски является обязательным. В общественных местах нет возможности проверить каждого человека на ношение маски. Предложен способ обнаружения маски на лице человека с помощью методов глубокого обучения и сверточных нейронных сетей (Convolutional Neural Network, CNN). Облачный подход основан на глубоком обучении и используется для выявления лиц, нарушающих правила. Набор данных, примененный в работе, заимствован из научных исследований, таких как Prajnasb/observations и набор данных Kaggle Face Mask Detection. Данные содержат изображения людей в масках и без них. Лица на изображениях обнаруживаются и выделяются с помощью специального обученного детектора лиц. Обнаружение маски осуществлено с помощью детектора и CNN. Входное изображение направляется в сеть, а выходные данные представляются в двоичном формате независимо от того, обнаружена маска или нет. В работе использованы слои CNN Max Pooling и Average Pooling. Результат исследования предложенного метода показал, что метод позволяет достичь 98 % точности на максимальном объеме тестовых изображений.

**Ключевые слова**

сверточные нейронные сети, CNN, PyTorch, глубокое обучение, облако

**Ссылка для цитирования:** Комал Венугопал В., Лалит М., Арун Кумар Т., Джаяшри Д., Виджаяшри Д. Облачная интеллектуальная система мониторинга для обнаружения нарушений ношения маски и выдачи предупреждений // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2022. Т. 22, № 3. С. 528–537 (на англ. яз.). doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-3-528-537

## Introduction

The COVID-19 pandemic has created a major impact on the world in many ways such as affecting the economy and also stopped people for many days who has to travel from one place to another place. Since the virus transmits from one person to another through expired air, the speed of the transmission is increasing rapidly [1]. Having the need to stop the spread of the virus, which is increasing day by day, many governments all across the world have imposed lock down, and they allow people to come out only to buy daily essentials. But there also exists a high risk of coming out from the houses at the contaminated zones since the spread of the virus is very high in those zones [2]. To prevent the spread of the virus, many countries have imposed strict rules about wearing a mask in public places. Since all the people cannot be proctored individually to check whether they are wearing a mask or not, with the help of artificial intelligence we can get an analysis about the places where most of the people are not wearing masks with the help of deep CNN. This model can be implemented in real time cameras of Closed Circuit Television (CCTV), and there are no restrictions since everything is cloudified and can run anywhere because there is no platform dependency in any step.

DL models are used recently to learn the features of the dataset which help in handling the large amount of data that we get from different sources. It is almost impossible to classify this data using normal Machine Learning Algorithms. The classical Machine Learning Algorithms learn the data by parsing it which leads to poor accuracy when we have diverse and huge data. In case of this type, DL helps by creating an artificial neural network that learns from previous experiences without getting programmed explicitly [3]. DL procedure creates its own decisions and doesn't depend only on the data provided. There are different types of DL techniques available: multi-layer perception, Recurrent Neural Networks, CNN, and Modular Neural Networks which have their use-cases.

CNN is the popular class in Learning for its ability to understand visual imagery. CNN have been a revolution on the computer vision domain. Initially, there were some image processing techniques but they were not able to generate a state-of-the-art result. Whenever CNN have been introduced, they have started producing state-of-the-art results [4]. A specified kernel is placed on the image matrix, and a new convolution matrix is formed from the combination of these two matrices. Pooling is applied on the newly formed matrix that helps in reducing the dimensions of the image so that the image processing gets done quicker than the previous one. In this paper, we use Max and Average Pooling layers in CNN and compare them with the results. Max Pooling is done by using the maximum pixel value when Kernel and Average Pooling takes the average pixel value. The image gets flattened after pooling and gets classified. This process gets repeated for a certain number of epochs for all the images. The complexity and size of DL models are drastically increasing to achieve state-of-the-art results. New model architectures are constantly being developed with millions and billions of learnable parameters in the model. Recently, OpenAI company has developed GPT-3 which consists of 175 billion parameters, and it has achieved state-of-the-art results at many tasks [5]. In the real-world scenarios, where we need to deploy these huge models, we might face issues such as storage, hardware requirements, etc., since these models require a lot of storage and advanced hardware for faster inference. We have used Knowledge distillation to reduce the size of the model by having a lesser number of parameters when compared to the original model; we are reducing the original model size by 40 % of the originally trained model such that the inference becomes 60 % faster and with the same accuracy as the Teacher model. The remainder of the paper is organized as follows.

We discuss the various studies done on the facemask detection using different algorithms in the recent years along with the results obtained. Later we give an overview of CNN Architecture; a dataset was used and it shows the working of our model with the detailed architecture diagram. Then we explain the metrics used to evaluate the performance of the model and compare the results to find the best accurate model. And finally, we outline the

advantages of using the Cloud Architecture, the future scope of this work concluding the paper.

## Literature review

In this section, the studies of different algorithms used in the currently available works are discussed. Fu et al. [3] proposed a fast detection framework /DSSD (Deconvolution Single Shot Detector). The work uses VOC and COCO datasets to evaluate the performance of their own model. They used pretrained ILSVRC CLS-LOC dataset for experimental evaluation. The work achieves overall 82 % of accuracy which is not efficient for proving the achievements. However, the work achieves training process in a less amount of time. Therefore, the time complexity of the training process is reduced compared to other works. CNN is the popular class in Learning for its ability to understand visual imagery. CNN have been a revolution on the computer vision domain. Initially, there were some image processing techniques as they were not able to generate a state-of-the-art result; but when CNN have been introduced, they have started producing state-of-the-art results. Lin et al. [4] proposed an object detection technique based on feature pyramids. A specified Kernel is placed on the image matrix and a new convolution matrix is formed from the combination of these two matrices. Pooling is applied on the newly formed matrix that helps in reducing the dimensions of the image so that the image processing gets done quicker than the previous one. The work uses COCO dataset for the evaluation of the proposed model. Author concludes that the Feature Pyramid Network is efficient for applying feature extraction based on CNN model. However, the training process is very difficult which leads to increased cost and time. Farfade et al. [6] describe the concept of extracting the faces from the given images, and it has been well explained in this paper. There has been specified how to extract the region of interest (in this case, it is the face of the person in the image), and we get the coordinates of the face in the image. The computational power required to train this model is very high, so it cannot be done in a CPU since there are many calculations to be done in parallel to save time; but computing with the help of CPU consumes a lot of time whereas while using a GPU it can be done very fast when compared to computational time using a CPU due to its parallel processing capability. Chen et al. [7] had compared the results between SVM, DNN, CNN, and CNN using transfer learning, and the CNN model with transfer learning and generated better results when compared to other models. Geoffrey et al. [8] proposed a Knowledge distillation model that is considered as a single model based on compression technique. Authors have suggested that the combination of difference machine learning algorithms to build a prediction is an inefficient approach that makes the process slow. Even though, the idea is quite different and useful, but the method cannot guarantee the better performance in terms of accuracy and time.

From the literature studies, all model focused only on the complexity of training which do not guarantee the better performance. We also observed that the robust Cloud Solution for the face-mask-detection is not available in the current scenario. The models used for identification are not so accurate. In this paper, we use Max and Average Pooling layers in CNN and compare them with the results. Max Pooling is done by using the maximum pixel value when Kernel and Average Pooling takes the average pixel value. The image gets flattened after pooling and gets classified. This process gets repeated for a certain number of epochs for all the images. We also adopted the approach proposed by Knowledge distillation [9] and compared the results for Max Pooling and Min Pooling of the Teacher model, and used the most accurate result in the Student model.

## Proposed methodology

To build a prediction model, all the resources are created that are required for the flow of the process initially. Dataset details are given in the next section. The main objective of the paper is to improve the accuracy with reduced processing time. Amazon Web Services (AWS) are offered by Amazon with a wide range of services that are required for the end-to-end setup for any online application. AWS Lamda will help in executions of certain tasks and needs to be run after particular process completes its execution. In this model, we use the AWS Lambda resource which will help in running an event after it found any changes in the specified AWS Simple Cloud Storage (AWS S3) location. Amazon Elastic Compute Cloud (AWS EC2) instance is a remote machine that can act as the server and is used to run all the scripts and maintain the MYSQL database. AWS S3 is a remote storage resource that helps in storing the videos and images of the violators and processing them to the server. Amazon Simple Notification Service (AWS SNS) helps in transferring mails and alerts to the subscribed users from AWS Lambda. AWS Identitity access management (IAM) is used in creating login username and password for different users. We need to attach the permissions required for the operations to that user. These permissions are attached as a json code which is called a policy. As a first part of the work, a role is created in AWS IAM with the policy attached to it, having all the access permissions for the two AWS S3 buckets, AWS Lambda, AWS EC2, and AWS SNS. The login credentials are generated from Security Credentials in IAM and the same role can be used across every stage of the process. We can communicate to AWS cloud by configuring the AWS credentials in AWS EC2 within the default profile. An SNS subscription has to be created which will mail to the email-id provided after AWS Lambda is invoked. In this proposed model, the OpenCV records the video of the surroundings every 4 hours. The video is then uploaded into the first AWS S3 bucket by configuring the AWS Access credentials using the Python Boto3 package having the city name as the prefix in the S3 bucket. We can process multiple videos from multiple locations that get forwarded to a folder in S3 bucket having the zip code of the location as a folder name [9]. Now AWS Lambda has to be set up to get data from AWS S3 and dump the data into an Amazon EC2 instance. AWS Lambda will apply SSH to the EC2 instance using the Python Paramiko library and copy the files from AWS S3 to the folder in EC2 instance. After copying the data, AWS Lambda will trigger a Python script that will run the

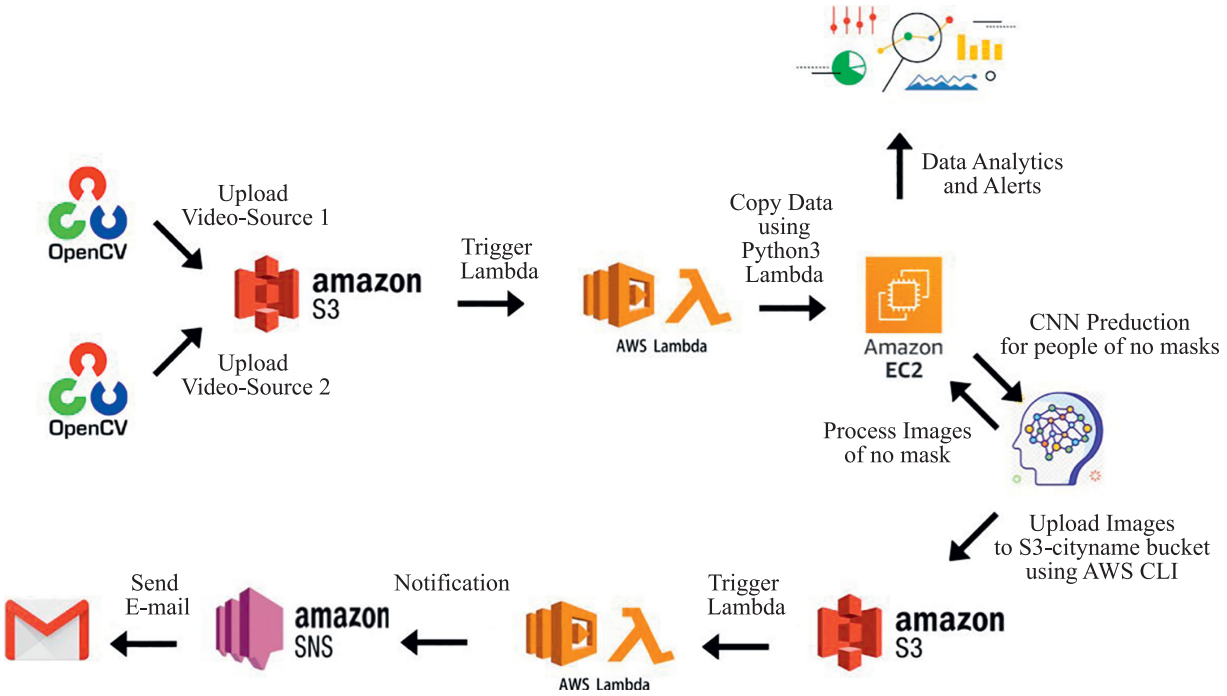



*Fig. 1*. Architecture for Sending Mails of Violator Images

CNN model and identify the images of persons not wearing the masks. The images are then pushed into an MYSQL Database from the EC2 instance. When the image is pushed into MYSQL Database, it also gets pushed into the AWS S3 location. The push into the AWS S3 location will trigger an AWS Lambda function that will send the image of the violator (as in Fig. 1) to the mailing address mentioned in the AWS SNS Subscription.

**Data set details**

The dataset used in this paper is collected from different online resources available which included data from Kaggle's Face Mask Detection Dataset and Prajnasb/observarion dataset. There are two classes in this problem: people wearing masks and people not wearing masks. To avoid the problem of over fitting, the images were collected almost equal in number. The total number of images contained in the dataset is 7553 [10]. The number of images of the people who are wearing masks is 3725 and the number of images of the people who are not wearing masks is 3828. Prajbnasb dataset is helpful in the work to identify the facial features of person. This dataset consist of 1376 images: 690 of these with wearing mask and 686 — without wearing mask. Many features like nose, eyes, mouth, eye brows and many others are located using facial landmarks of the dataset. Sample images for dataset without mask and images for without mask are shown in Fig. 2 and 3.

In Fig. 2, facial landmarks are used to automatically gather the location of facial features such as chin, nose, and mouth. Fig. 2 represents the images of faces in different views and the system shows "no mask detection". If all features such as nose, mouth, and chin are visible, then the system detects "no mask".

Fig. 3 shows the faces of people who worn mask in different positions. In Fig. 3, *a*, *c*, the mask fits perfectly. Improperly worn mask images are shown in Fig. 3, *b*, *d*. If

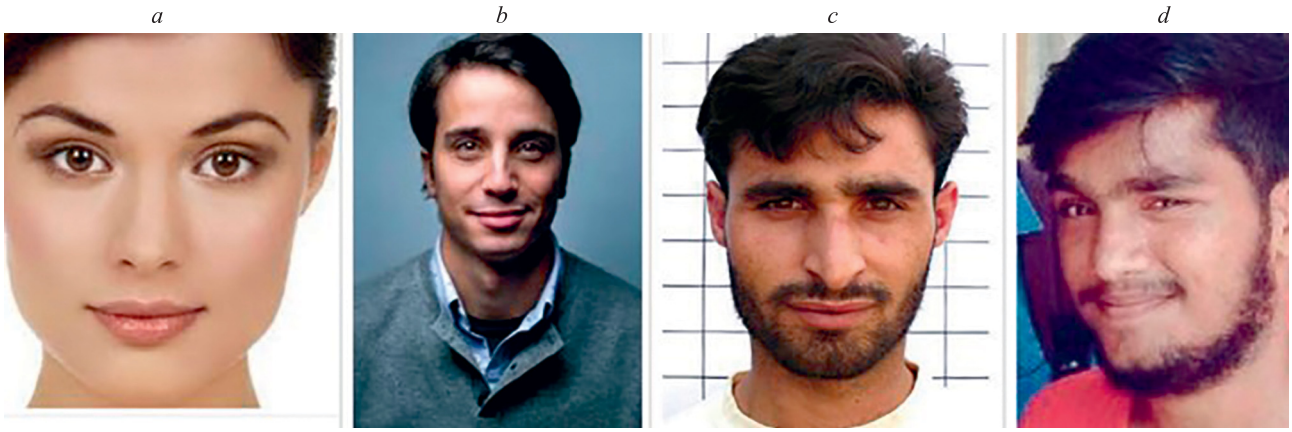



*Fig. 2*. Sample images belonging to dataset without mask

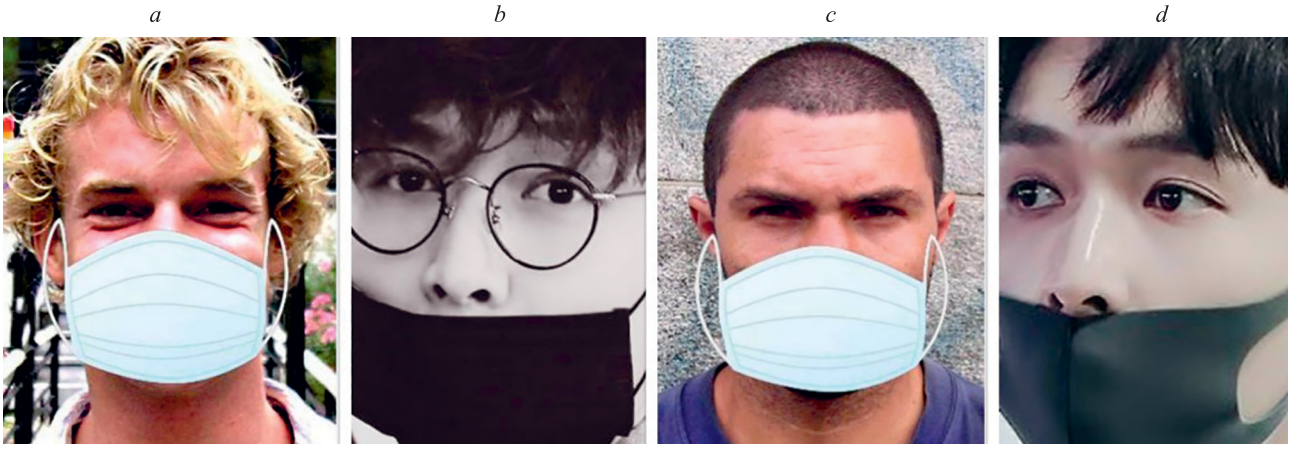



*Fig. 3*. Sample images belonging to data set with mask

any of the three features visible, then the system detects that the mask not worn properly.

**Training the CNN Model**

In this work, we have used DL Knowledge distillation and OpenCV library. The live video is captured by the cameras such as CCTV, and OpenCV accesses the live video. Then the video is split to different frames per second and the frames are fed to the pre-trained model that is implemented in this paper for inference to predict whether the person in the frame wears a mask or not. The result is highlighted in the video itself; the number of people in the frame might be more than 1. The frames are cropped in such a way that the faces of the people in the frame are detected using a pre-trained face detection model which gives us the coordinates of the face in the frame. The model to detect the face mask is trained in this work. We used CNN architecture to build the model as it is more suitable for vision tasks.

The CNN architecture in this work in Fig. 4 is made up of Convolutional and Max Pooling layers. To reduce the over-fitting in this model we have used some regularization techniques such as dropout which makes sure that no particular neuron plays a major role in the model while inferencing. First, the input image is pre-processed by using some augmentation techniques, and later it is converted to numeric matrices of 3 dimensions where each dimension contains the intensity values of red, green and blue in the pixel. Then these values are fed into the model as input. Second, the input values pass through the Convolutional layer where a filter of (3, 3) used, and padding and a stride of value 1 are applied on the input. Padding is applied to prevent the loss of information at the corners of the image so that the prediction might not be accurate if it misses some information. A ReLU activation function is used after the Convolutional layer. The inputs are passed to the ReLU activation function and then to Max Pooling layers where the dimension of the input gets reduced. A (3, 3) Kernel is used in Max Pooling, the dimension gets reduced and the important information is only preserved in the surrounding pixels. Then after passing the input data through a few Convolutional and Max Pooling layers, it is flattened and passed through a fully connected linear layer and then through a sigmoid layer where we get the output probability of the neuron. If the probability is above 0.5, then the person in the frame is wearing a mask; if it is less than 0.5, then the person in the frame is not wearing a mask. Since this comes under the binary classification problem, a binary cross-entropy loss is used here and the optimizer used for updating the weights is the Adam optimizer. 98 % of accuracy is observed using the Max Pooling in the CNN Architecture as shown in Fig. 5.

The CNN model using the Average Pooling has produced an accuracy of 97 % in detecting the facemasks.

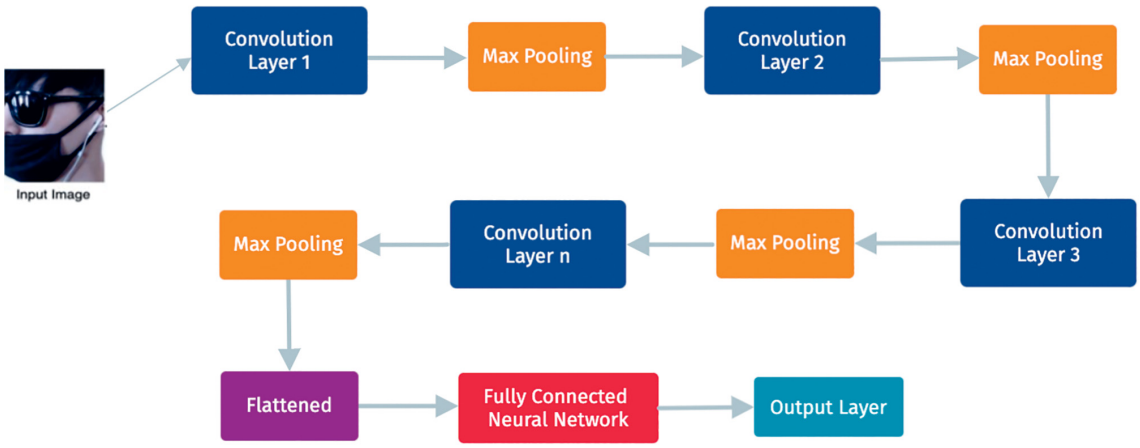



*Fig. 4*. CNN Architecture for Max Pooling

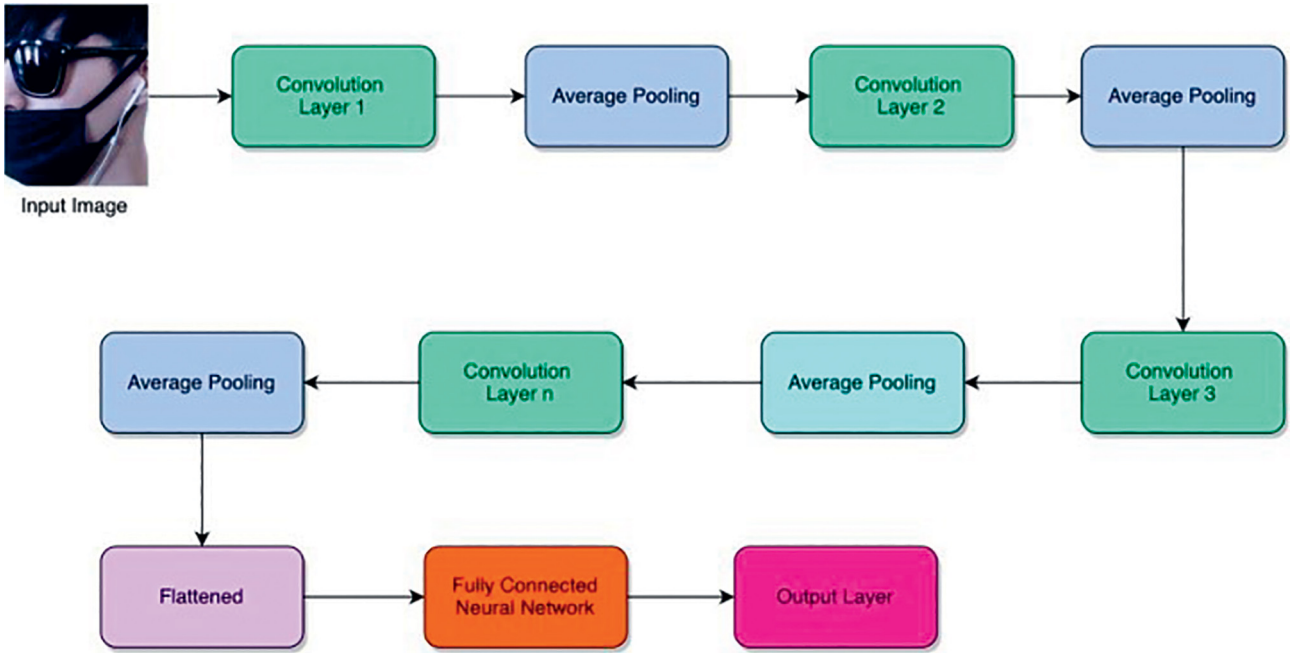



*Fig. 5*. CNN Architecture for Average Pooling

So, the Max Pooling was found to give the best results due to which it is used as Teacher model in the Knowledge distillation which is discussed in the next section.

**Knowledge distillation**

This model uses 6 convolutional and 3 dense layers containing a large number of trainable parameters. In this case, the inferencing becomes difficult because the input frames are continuously fed into the model and the output should be generated spontaneously [11]. But if we use such a large model trained, the inference becomes difficult, so we have used Knowledge distillation to overcome this problem. The model trained above is considered as Teacher model and the Student model consisting of lesser parameters than the trained Teacher model. The latter is trained using the training data for 50 epochs where the loss function in the Student model differs from the Teacher model. The loss function in the Student model is the sum of loss functions on hard labels and the loss on soft labels, which are the normalized probability distribution of the Teacher model output logits, calculated using temperature-based Softmax function. The parameters are shown in Table.

In the training, the temperature controls the peak distribution of the normalized probabilities. The peak values will become more peak and the least values will reduce further by applying temperature to the Softmax function. The parameters which are not learnable and defined manually are called hyperparameters. During the training, the learnable parameters get updated every iteration but there are no fixed values for hyperparameters. The hyperparameters, set while training the DL model, are the learning rate that is used in the optimizer, in the number of epochs the model is trained, in the batch size of the data while training, and in the activation functions used [11]. These hyperparameter values are experimental, so we have experimented with different values and finalized a model which achieves better accuracy with less over fitting. The temperature value in the Softmax function during Knowledge distillation is also a hyperparameter that varies from 0 to 1.

**Saving and Loading Model**

The model is trained with hyperparameters which produce better results. When the model is used in real-world scenarios, we can't train the model every time on the device. So, we are saving the model in such a format so that it can be loaded whenever it is required. The weights freeze after the training and then are saved into a particular format such as h5 or pt based on the framework the model is trained on. In this case, we have used PyTorch for data augmentation and model training, then saving the model. When the model is used in a flask web framework, the model is loaded into the RAM when the service is started, this saves a lot of time [12]. The saved model can easily be transferred to the devices for inference. It can also be deployed in edge devices such as smartphones and IoT devices.

**Alert Simulation**

An MYSQL trigger is a setup on a mask table that will alter the count on the city table for the zip code of the image. This data helps to find statistics and to analyze the data for finding the most vulnerable locations and giving alerts. The MYSQL table structure is as follows.

— mask (id, image, zipcode)
— city (zipcode, phone_number, count)

Once the count is updated, the Python script will check if the count is greater than 500; and if it returns true, then the message is sent to the phone_number in the city table using the Sinch API credentials. The architecture for sending SMS is given in Fig. 6.

## Results and discussion

We considered Precision, Recall, F1-score, and Accuracy as the metrics to evaluate the performance of

*Table. Se*quential order of layers in network with output shape, number of parameters used

| Layer (type) | Output Shape | Param # |
|---|---|---|
| conv2d_1 (Conv2D) | (None, 76, 76, 64) | 4864 |
| batch_normalization_1 | (None, 76, 76, 64) | 256 |
| conv2d_2 (Conv2D) | (None, 72, 72, 64) | 102464 |
| max_pooling2d_1 (MaxPooling2D) | (None, 36, 36, 64) | 0 |
| batch_normalization_2 | (None, 36, 36, 64) | 256 |
| dropout_1 (Dropout) | (None, 36, 36, 64) | 0 |
| conv2d_3 (Conv2D) | (None, 32, 32, 128) | 204928 |
| batch_normalization_3 | (None, 32, 32, 128) | 512 |
| conv2d_4 (Conv2D) | (None, 28, 28, 128) | 409728 |
| max_pooling2d_2 (MaxPooling2D) | (None, 14, 14, 128) | 0 |
| batch_normalization_4 | (None, 14, 14, 128) | 512 |
| dropout_2 (Dropout) | (None, 14, 14, 128) | 0 |
| conv2d_5 (Conv2D) | (None, 10, 10, 256) | 819456 |
| batch_normalization_5 | (None, 10, 10, 256) | 1024 |
| conv2d_6 (Conv2D) | (None, 6, 6, 256) | 1638656 |
| max_pooling2d_3 (MaxPooling2D) | (None, 3, 3, 256) | 0 |
| batch_normalization_6 | (None, 3, 3, 256) | 1024 |
| dropout_3 (Dropout) | (None, 3, 3, 256) | 0 |
| flatten_1 (Flatten) | (None, 2304) | 0 |
| dense_1 (Dense) | (None, 256) | 590080 |
| batch_normalization_7 | (None, 256) | 1024 |
| dropout_4 (Dropout) | (None, 256) | 0 |
| dense_2 (Dense) | (None, 60) | 15420 |
| batch_normalization_8 | (None, 60) | 240 |
| dropout_5 (Dropout) | (None, 60) | 0 |
| dense_3 (Dense) | (None, 1) | 232 |

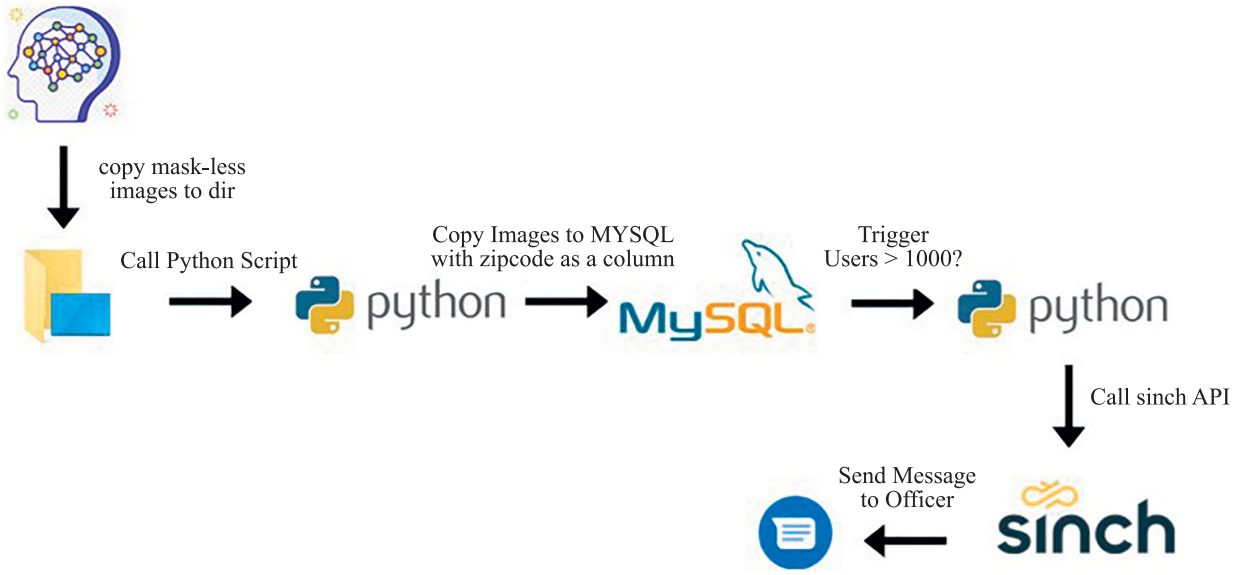



*Fig. 6*. Sending SMS if violations limit is reached in a location

the model in both the training and the testing phases. The values of metrics can be generated using these formulae as follows, where "TP" stands for True Positives; "FP" stands for False Positives; "TN" stands for True Negatives; and "FN" stands for False Negatives.

$$\text{Precision} = \frac{\text{TP}}{\text{TP} + \text{FP}}$$

$$\text{Recall} = \frac{\text{TP}}{\text{TP} + \text{FN}}$$

$$\text{Accuracy} = \frac{\text{TP} + \text{TN}}{\text{TP} + \text{TN} + \text{FP} + \text{FN}}$$

$$\text{F1} - \text{Score} = \frac{2 \times \text{Precision} \times \text{Recall}}{\text{Precision} + \text{Recall}}.$$

The proposed mode is applied on Kaggle's dataset and Prajnasb dataset. After training and obtaining the results on the test set, the best performing model is considered as the Teacher model after the Knowledge distillation [13–18]. The recall is observed 67 % using Max pooling and 57 % by Average Pooling for with-mask data whereas the recall is found to be same in both the cases for without-mask data. Precision is found to be the same in both cases for with-mask data; whereas the precision is 98 % by Max Pooling, and 97 % by using Average Pooling for without-mask data. F1-score is observed as 80 % using Max Pooling and 73 % using the Average Pooling for with-mask data; whereas it is 98 % for Max Pooling and 98 % for Average Pooling for without-mask data. Comparing both data sets, it is observed that Max Pooling is giving better results compared to Average Pooling by 1 % with Precision, 10 % with Recall. On average, Max Pooling is giving better F1-Score compared to the Average Pooling by 4 %. We also observed 1 % more accuracy using the Max Pooling. Hence, we found the Max Pooling is giving better results when compared to Average Pooling in all the metrics. Hence, the Student model is trained with the help of the Teacher model which in this case is the model built with Max Pooling as the pooling layer in the CNN architecture. Fig. 7, *a* shows the performance of pooling layer with mask label and Fig. 7, *b* shows the performance of pooling layer without mask label.

The inferencing will be continuously happening on the model as it is a video and the frames are constantly fed to the model for inference [19–24]. The model should predict the results faster as well as accurately as shown in Fig. 8. To maintain this tradeoff, the complexity of the model should not be too high and the accuracy of the model should also be taken care [25–28]. Knowledge distillation can be applied to our model to create a Student model which is smaller in size and it is also as accurate as of the Teacher model. After creating a Student model, the weights of the model are saved and can be used in different applications.

We have observed the increase in the accuracy from the Student model as the epochs are progressed, and finally the Student model gave 98 % accuracy after the Knowledge distillation for the Teacher model using the Max Pooling layer.

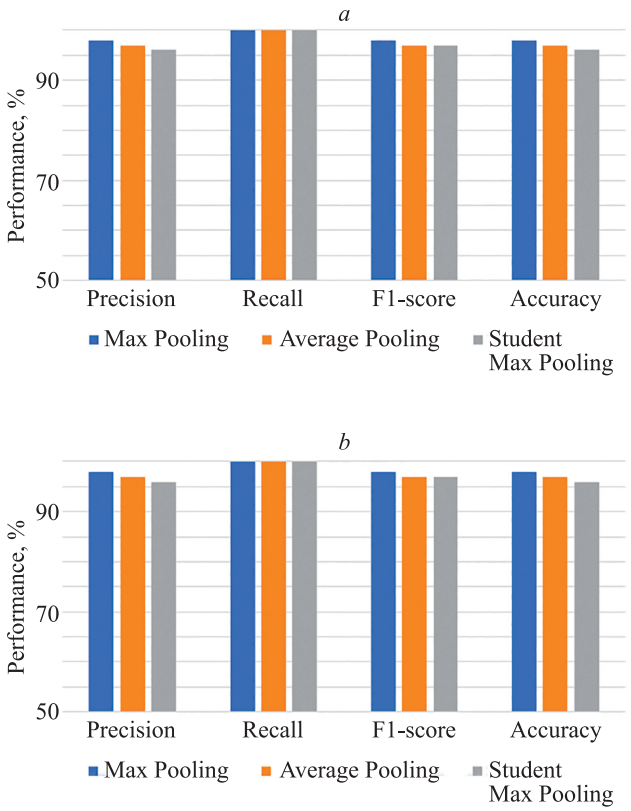



*Fig. 7*. Performance of merging layers for a label: with a mask (*a*); without a mask (*b*)

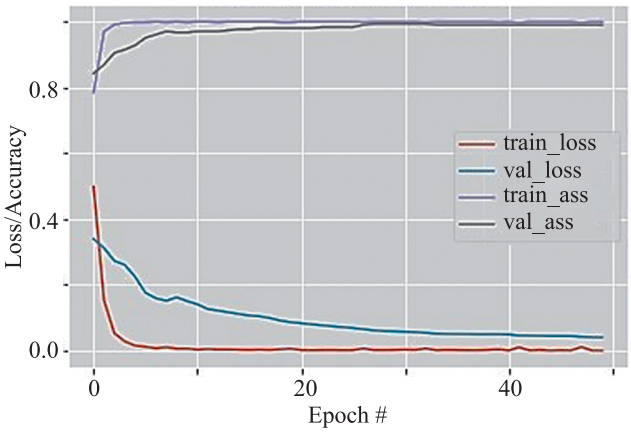



*Fig. 8*. Training and Validation loss for Student model

## Conclusion

In summary, we propose a lightweight model for face mask detection using Knowledge distillation. The need to increase awareness about wearing masks is increasing rapidly, and to make the rules stricter, the government is imposing fines to people who are violating the rules for not wearing a mask [15]. This cloud-based approach makes the job a lot easier and provides timely alerts and notifications that help in identifying the danger zones and take necessary precautions by implementing lock-down in those areas and so forth [16]. The same architecture can be implemented to identify the people who are sick and coughing in the public places using the respective machine learning models and

create a secure environment for the public [17]. The work achieves an accuracy of 98 % using Max Pooling layer in predicting the mask-less people, and there is a scope for improving the accuracy to implement the model in real time. In future, we plan to apply other detection methods such as R-CNN to detect the exact type of the mask.

**References**


1. Nagrath P., Jain R., Madan A., Arora R., Kataria P., Hemanth J. SSDMNV2: A real time DNN-based face mask detection system using single shot multibox detector and MobileNetV2. *Sustainable Cities and Society*, 2021, vol. 66, pp. 102692. https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102692
2. Matrajt L., Leung T. Evaluating the effectiveness of social distancing interventions to delay or flatten the epidemic curve of coronavirus disease. *Emerging Infectious Diseases*, 2020, vol. 26, no. 8, pp. 1740–1748. https://doi.org/10.3201/eid2608.201093
3. Fu C., Liu W., Ranga A., Tyagi A., Berg A. DSSD: deconvolutional single shot detector model. *arXiv*, 2017, arXiv:1701.06659. https://doi.org/10.48550/arXiv.1701.06659
4. Lin T.Y., Dollár P., Girshick R., He K., Hariharan B., Belongie S. Future pyramid networks for object detection. *Proc. of the 30th IEEE Conference Proceedings on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2017, pp. 936–944. https://doi.org/10.1109/CVPR.2017.106
5. Sandler M., Howard A., Zhu M., Zhmoginov A., Chen L.-C. MobileNetV2: Inverted residuals and linear bottlenecks. *Proc. of the 31st Meeting of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2018, pp. 4510–4520. https://doi.org/10.1109/CVPR.2018.00474
6. Farfade S.S., Saberian M.J., Li L. Multi-view face detection using deep convolutional neural networks. *Proc. of the 5th ACM International Conference on Multimedia Retrieval (ICMR)*, 2015, pp. 643–650. https://doi.org/10.1145/2671188.2749408
7. Chen S., Zhang C., Dong M., Le J., Rao M. Using ranking-CNN for age estimation. *Proc. of the 30th IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2017, pp. 742–751. https://doi.org/10.1109/CVPR.2017.86
8. Hinton G., Vinyals O., Dean J. Distilling the knowledge in a neural network. *arXiv*, 2015, arXiv:1503.02531. https://doi.org/10.48550/arXiv.1503.02531
9. Bandaru A., Bhadani A., Sinha A. A facemask detector using machine learning and image processing techniques. *Engineering Science and Technology an International Journal*, 2020.
10. Gurav O. *Face Mask Detection Dataset. 2020*. Available at: https://www.kaggle.com/omkargurav/face-mask-dataset (accessed: 25.12.2021)
11. Ren S., He K., Girshick R., Sun J. Faster R-CNN: Towards real-time object detection with region proposal networks. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2017, vol. 39, no. 6, pp. 1137–1149. https://doi.org/10.1109/TPAMI.2016.2577031.
12. Viola P., Jones M. Rapid object detection using a boosted cascade of simple features. *Proc. of the 2001 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. V. 1, 2001, pp. I511–I518. https://doi.org/10.1109/CVPR.2001.990517
13. Oro D., Fernández C., Saeta J.R., Martorell X., Hernando J. Real-time GPU-based face detection in HD video sequences. *Proc. of the IEEE International Conference on Computer Vision Workshops (ICCV)*, 2011, pp. 530–537. https://doi.org/10.1109/ICCVW.2011.6130288
14. Glass R.J., Glass L.M., Beyeler W.E., Min H.J. Targeted social distancing designs for pandemic influenza. *Emerging Infectious Diseases*, 2006, vol. 12, no. 11, pp. 1671–1681. https://doi.org/10.3201/eid1211.060255
15. Masita K.L., Hasan A.N., Satyakama P. Pedestrian detection using R-CNN object detector. *IEEE Latin American Conference on Computational Intelligence (LA-CCI)*, 2018, pp. 8625210. https://doi.org/10.1109/LA-CCI.2018.8625210
16. Girshick R. Fast R-CNN. *Proc. of the 15th IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*, 2015, pp. 1440–1448. https://doi.org/10.1109/ICCV.2015.169
17. Zhu X., Ramanan D. Face detection, pose estimation, and landmark localization in the wild. *Proc. of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2012, pp. 2879–2886. https://doi.org/10.1109/CVPR.2012.6248014
18. Howard A.G., Zhu M., Chen B., Kalenichenko D., Wang W., Weyand T., Andreetto M., Adam H. MobileNets: Efficient


**Литература**


1. Nagrath P., Jain R., Madan A., Arora R., Kataria P., Hemanth J. SSDMNV2: A real time DNN-based face mask detection system using single shot multibox detector and MobileNetV2 // Sustainable Cities and Society. 2021. V. 66. P. 102692. https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102692
2. Matrajt L., Leung T. Evaluating the effectiveness of social distancing interventions to delay or flatten the epidemic curve of coronavirus disease // Emerging Infectious Diseases. 2020. V. 26. N 8. P. 1740–1748. https://doi.org/10.3201/eid2608.201093
3. Fu C., Liu W., Ranga A., Tyagi A., Berg A. DSSD: deconvolutional single shot detector model // arXiv. 2017. arXiv:1701.06659. https://doi.org/10.48550/arXiv.1701.06659
4. Lin T.Y., Dollár P., Girshick R., He K., Hariharan B., Belongie S. Future pyramid networks for object detection // Proc. of the 30th IEEE Conference Proceedings on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2017. P. 936–944. https://doi.org/10.1109/CVPR.2017.106
5. Sandler M., Howard A., Zhu M., Zhmoginov A., Chen L.-C. MobileNetV2: Inverted residuals and linear bottlenecks // Proc. of the 31st Meeting of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2018. P. 4510–4520. https://doi.org/10.1109/CVPR.2018.00474
6. Farfade S.S., Saberian M.J., Li L. Multi-view face detection using deep convolutional neural networks // Proc. of the 5th ACM International Conference on Multimedia Retrieval (ICMR). 2015. P. 643–650. https://doi.org/10.1145/2671188.2749408
7. Chen S., Zhang C., Dong M., Le J., Rao M. Using ranking-CNN for age estimation // Proc. of the 30th IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2017. P. 742–751. https://doi.org/10.1109/CVPR.2017.86
8. Hinton G., Vinyals O., Dean J. Distilling the knowledge in a neural network // arXiv. 2015. arXiv:1503.02531. https://doi.org/10.48550/arXiv.1503.02531
9. Bandaru A., Bhadani A., Sinha A. A facemask detector using machine learning and image processing techniques // Engineering Science and Technology an International Journal. 2020.
10. Gurav O. Face Mask Detection Dataset. 2020 [Электронный ресурс]. URL: https://www.kaggle.com/omkargurav/face-mask-dataset (дата обращения: 25.12.2021).
11. Ren S., He K., Girshick R., Sun J. Faster R-CNN: Towards real-time object detection with region proposal networks // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2017. V. 39. N 6. P. 1137–1149. https://doi.org/10.1109/TPAMI.2016.2577031.
12. Viola P., Jones M. Rapid object detection using a boosted cascade of simple features // Proc. of the 2001 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). V. 1. 2001. P. I511–I518. https://doi.org/10.1109/CVPR.2001.990517
13. Oro D., Fernández C., Saeta J.R., Martorell X., Hernando J. Real-time GPU-based face detection in HD video sequences // Proc. of the IEEE International Conference on Computer Vision Workshops (ICCV). 2011. P. 530–537. https://doi.org/10.1109/ICCVW.2011.6130288
14. Glass R.J., Glass L.M., Beyeler W.E., Min H.J. Targeted social distancing designs for pandemic influenza // Emerging Infectious Diseases. 2006. V. 12. N 11. P. 1671–1681. https://doi.org/10.3201/eid1211.060255
15. Masita K.L., Hasan A.N., Satyakama P. Pedestrian detection using R-CNN object detector // IEEE Latin American Conference on Computational Intelligence (LA-CCI). 2018. P. 8625210. https://doi.org/10.1109/LA-CCI.2018.8625210
16. Girshick R. Fast R-CNN // Proc. of the 15th IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV). 2015. P. 1440–1448. https://doi.org/10.1109/ICCV.2015.169
17. Zhu X., Ramanan D. Face detection, pose estimation, and landmark localization in the wild // Proc. of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2012. P. 2879–2886. https://doi.org/10.1109/CVPR.2012.6248014
18. Howard A.G., Zhu M., Chen B., Kalenichenko D., Wang W., Weyand T., Andreetto M., Adam H. MobileNets: Efficient

convolutional neural networks for mobile vision applications. *arXiv*, arXiv:1704.04861, 2017. https://doi.org/10.48550/arXiv.1704.04861
19. Nagrath P., Jain R., Madan A., Arora R., Kataria P., Hemanth J. SSDMNV2: A real time DNN-based face mask detection system using single shot multibox detector and MobileNetV2. *Sustainable Cities and Society*, 2021, vol. 66, pp. 102692. https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102692
20. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. *Deep Learning*. MIT Press, 2016, 800 p.
21. Jiang M., Fan X., Yan H. Retina Mask: A Face Mask detector. *arXiv*, 2020, arXiv:2005.03950v2. https://doi.org/10.48550/arXiv.2005.03950
22. Jiang X., Gao T., Zhu Z., Zhao Y. Real-Time Face Mask Detection Method Based on YOLOv3. *Electronics*, 2021, vol. 10, no. 7, pp. 837. https://doi.org/10.3390/electronics10070837
23. Liu S., Again S.S. COVID-19 face mask detection in a crowd using multi-model based on YOLOv3 and hand-crafted features. *Proceedings of SPIE*, 2021, vol. 11734, pp. 117340–117340. https://doi.org/10.1117/12.2586984
24. Sen S., Sawant K. Face mask detection for covid_19 pandemic using pytorch in deep learning. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2021, vol. 1070, pp. 012061. https://doi.org/10.1088/1757-899X/1070/1/012061
25. Sethi S., Kathuria M., Kaushik T. A real-time integrated face mask detector to curtail spread of coronavirus. *Computer Modeling in Engineering & Sciences*, 2021, vol. 127, no. 2, pp. 389–409. https://doi.org/1032604/cmes.2021.014478
26. Srivastava P., Khan R. A review paper on cloud computing. *International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering*, 2018, vol. 8, no. 6, pp. 17. https://doi.org/10.23956/ijarcsse.v8i6.711
27. Susanto S., Putra F.A., Analia R., Suciningtyas I.K.L.N. The face mask detection for preventing the spread of COVID-19 at Politeknik Negeri Batam. *Proc. of the 3rd International Conference on Applied Engineering (ICAE)*, 2020, pp. 9350556. https://doi.org/10.1109/ICAE50557.2020.9350556
28. Wang Z., Wang G., Huang B., Xiong Z., Hong Q., Wu H., Yi P., Jiang K., Wang N., Pei Y., Chen H., Miao Y., Huang Z., Liang J. Masked face recognition dataset and application. *arXiv*, 2020, arXiv:2003.09093v2. https://doi.org/10.48550/arXiv.2003.09093

convolutional neural networks for mobile vision applications // arXiv. arXiv:1704.04861. 2017. https://doi.org/10.48550/arXiv.1704.04861
19. Nagrath P., Jain R., Madan A., Arora R., Kataria P., Hemanth J. SSDMNV2: A real time DNN-based face mask detection system using single shot multibox detector and MobileNetV2 // Sustainable Cities and Society. 2021. V. 66. P. 102692. https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102692
20. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. Deep Learning. MIT Press, 2016. 800 p.
21. Jiang M., Fan X., Yan H. Retina Mask: A Face Mask detector // arXiv. 2020. arXiv:2005.03950v2. https://doi.org/10.48550/arXiv.2005.03950
22. Jiang X., Gao T., Zhu Z., Zhao Y. Real-Time Face Mask Detection Method Based on YOLOv3 // Electronics. 2021. V. 10. N 7. P. 837. https://doi.org/10.3390/electronics10070837
23. Liu S., Again S.S. COVID-19 face mask detection in a crowd using multi-model based on YOLOv3 and hand-crafted features // Proceedings of SPIE. 2021. V. 11734. P. 117340–117340. https://doi.org/10.1117/12.2586984
24. Sen S., Sawant K. Face mask detection for covid_19 pandemic using pytorch in deep learning // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. V. 1070. P. 012061. https://doi.org/10.1088/1757-899X/1070/1/012061
25. Sethi S., Kathuria M., Kaushik T. A real-time integrated face mask detector to curtail spread of coronavirus // Computer Modeling in Engineering & Sciences. 2021. V. 127. N. 2. P. 389–409. https://doi.org/1032604/cmes.2021.014478
26. Srivastava P., Khan R. A review paper on cloud computing // International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering. 2018. V. 8. N 6. P. 17. https://doi.org/10.23956/ijarcsse.v8i6.711
27. Susanto S., Putra F.A., Analia R., Suciningtyas I.K.L.N. The face mask detection for preventing the spread of COVID-19 at Politeknik Negeri Batam // Proc. of the 3rd International Conference on Applied Engineering (ICAE). 2020. P. 9350556. https://doi.org/10.1109/ICAE50557.2020.9350556
28. Wang Z., Wang G., Huang B., Xiong Z., Hong Q., Wu H., Yi P., Jiang K., Wang N., Pei Y., Chen H., Miao Y., Huang Z., Liang J. Masked face recognition dataset and application // arXiv. 2020. arXiv:2003.09093v2. https://doi.org/10.48550/arXiv.2003.09093

## Authors

**Vattumilli Komal Venugopal** — B.Tech., Student, School of Computer Science and Engineering, Vellore Institute of Technology, Vellore, 632014, India, https://orcid.org/0000-0002-9292-7473, komalvenugopal@gmail.com

**Movva Lalith** — B.Tech., Student, School of Computer Science and Engineering, Vellore Institute of Technology, Vellore, 632014, India, https://orcid.org/0000-0002-1767-3186, lalithindian@gmail.com

**Thangavelu Arun Kumar** — Professor, School of Computer Science and Engineering, Vellore Institute of Technology, Vellore, 632014, India, SC 57055634400, https://orcid.org/0000-0001-7384-8975, arunkumart@vit.ac.in

**Jayaraman Jayashree** — Professor, School of Computer Science and Engineering, Vellore Institute of Technology, Vellore, 632014, India, SC 57191669840, https://orcid.org/0000-0002-0191-8070, jayashree.j@vit.ac.in

**Jayaraman Vijayashree** — Professor, School of Computer Science and Engineering, Vellore Institute of Technology, Vellore, 632014, India, SC 57190985580, https://orcid.org/0000-0001-6987-3377, vijayashree.j@vit.ac.in

## Авторы

**Комал Венугопал Ваттумилли** — студент, Школа компьютерных наук и инженерии, Технологический институт Веллору, Веллуру, 632014, Индия, https://orcid.org/0000-0002-9292-7473, komalvenugopal@gmail.com

**Лалит Мовва** — студент, Школа компьютерных наук и инженерии, Технологический институт Веллору, Веллуру, 632014, Индия, https://orcid.org/0000-0002-1767-3186, lalithindian@gmail.com

**Арун Кумар Тангавелу** — профессор, Школа компьютерных наук и инженерии, Технологический институт Веллору, Веллуру, 632014, Индия, SC 57055634400, https://orcid.org/0000-0001-7384-8975, arunkumart@vit.ac.in

**Джаяшри Джаяраман** — профессор, Школа компьютерных наук и инженерии, Технологический институт Веллору, Веллуру, 632014, Индия, SC 57191669840, https://orcid.org/0000-0002-0191-8070, jayashree.j@vit.ac.in

**Виджаяшри Джаяраман** — профессор, Школа компьютерных наук и инженерии, Технологический институт Веллору, Веллуру, 632014, Индия, SC 57190985580, https://orcid.org/0000-0001-6987-3377, vijayashree.j@vit.ac.in

*Received 20.02.2022*
*Approved after reviewing 25.03.2022*
*Accepted 19.05.2022*

*Статья поступила в редакцию 20.02.2022*
*Одобрена после рецензирования 25.03.2022*
*Принята к печати 19.05.2022*

Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ
май–июнь 2022 Том 22 № 3 http://ntv.ifmo.ru/
SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL OF INFORMATION TECHNOLOGIES, MECHANICS AND OPTICS
May–June 2022 Vol. 22 No 3 http://ntv.ifmo.ru/en/
ISSN 2226-1494 (print) ISSN 2500-0373 (online)
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК УНИВЕРСИТЕТ ИТМО
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ

doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-3-538-546

# Efficient incremental hash chain with probabilistic filter-based method to update blockchain light nodes

**Maher A. Maalla[1]✉, Sergey V. Bezzateev[2]**

[1,2] ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation
[2] Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg, 190000, Russian Federation

[1] maher.malla7@gmail.com✉, https://orcid.org/0000-0002-4806-8608
[2] bsv@aanet.ru, https://orcid.org/0000-0002-0924-6221

**Abstract**
In blockchain, ensuring integrity of data when updating distributed ledgers is a challenging and very fundamental process. Most of blockchain networks use Merkle tree to verify the authenticity of data received from other peers on the network. However, creating Merkle tree for each block in the network and composing Merkle branch for every transaction verification request are time-consuming process requiring heavy computations. Moreover, sending these data through the network generates a lot of traffic. Therefore, we proposed an updated mechanism that uses incremental hash chain with probabilistic filter to verify block data, provide a proof of data integrity and efficiently update blockchain light nodes. In this article, we prove that our model provides better performance and less required computations than Merkle tree while maintaining the same security level.

**Keywords**
Merkle tree, blockchain, hash chain, probabilistic filter, hash function, integrity

**For citation:** Maalla M.A., Bezzateev S.V. Efficient incremental hash chain with probabilistic filter-based method to update blockchain light nodes. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2022, vol. 22, no. 3, pp. 538–546. doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-3-538-546

УДК 004.056.55

# Эффективная инкрементная хеш-цепочка с вероятностным методом на основе фильтра для обновления легких узлов блокчейна

**Махер Аднан Маалла[1]✉, Сергей Валентинович Беззатеев[2]**

[1,2] Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация
[2] Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, 190000, Российская Федерация

[1] maher.malla7@gmail.com✉, https://orcid.org/0000-0002-4806-8608
[2] bsv@aanet.ru, https://orcid.org/0000-0002-0924-6221

**Аннотация**
В блокчейне обеспечение целостности данных при обновлении распределенных реестров является сложным и фундаментальным процессом. Большинство сетей блокчейнов для проверки подлинности данных, полученных от других одноранговых узлов в сети, используют дерево Меркла. Создание дерева Меркла для каждого блока в сети и составление ветви дерева для каждого запроса на проверку транзакции является трудоемким процессом, требующим больших вычислений. Кроме того, отправка этих данных по сети генерирует большой трафик. В работе предложен обновленный механизм, использующий инкрементную хеш-цепочку с вероятностным фильтром для проверки данных блока, предоставления доказательства целостности данных и эффективного обновления легких узлов блокчейна. Доказано, что предложенная модель обеспечивает более высокую производительность и требует меньше вычислений, чем дерево Меркла, сохраняя при этом тот же уровень безопасности.

© Maalla M.A., Bezzateev S.V., 2022

**Ключевые слова**
дерево Меркла, блокчейн, хеш-цепочка, вероятностный фильтр, хеш-функция, целостность

**Ссылка для цитирования:** Маалла М.А., Беззатеев С.В. Эффективная инкрементная хеш-цепочка с вероятностным методом на основе фильтра для обновления легких узлов блокчейна // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2022. Т. 22, № 3. С. 538–546 (на англ. яз.). doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-3-538-546

## Introduction

Blockchain is a peer-to-peer network that manages a distributed ledger and commits to some consensus protocol. It is considered as a promising and successful technology. In addition to its main importance in digital payment processing and money transfers, it has many applications as in supply chains, digital voting, immutable data backup, medical recordkeeping, and many other fields.

In its simple definition, blockchain is a way to encapsulate data in blocks where these blocks are linked through hash values to create an immutable chain of blocks which is very fundamental concept in blockchain to keep the data authentic without any possibility of updating or manipulating the already added blocks to the blockchain. Fig. 1 shows basic structure of blockchain, each block ($n$) in the blockchain consists of its hash ($n$) and the hash of the previous block ($n - 1$). In this way, every block hash is used in the next block header which leads to creating a chain of linked blocks.

This chain of hashes gives a way to verify the integrity of the blockchain by recalculating the hash for a block and comparing with the hash value in the block, then using this value to validate the next block. Therefore, any change in any block will lead to wrong hash value which in turn causes the verification process to fail for all the following blocks. This model maintains the integrity of the blockchain and provides an immutable distributed ledger system. In order to verify the data of blocks, which are basically transactions, blockchain relies on Merkle tree to verify all transactions existed in the block body using Merkle root hash which is stored in the block header [1].

The success of the blockchain concept is connected with the financial success of Bitcoin. Therefore, we will consider Bitcoin as our case study to explain blockchain structure in more detail and understand why Merkle tree is fundamental in blockchain. Fig. 2 demonstrates Bitcoin's detailed structure and how Merkle tree is constructed from all transactions in a block to produce Merkle root which is used to fully verify these transactions.

In Fig. 2, $T$ is timestamp of the block which indicates the exact moment in which the block has been mined and validated by blockchain network; $N$ is the nonce of the block which is a number added by miners to meet difficulty level restriction; $V$ is the blockchain version number; *diff* is the difficulty target for the block; and $H_x$ is the hash value of transaction $x$.

We will study Merkle tree model in blockchain and the process of verifying blocks transactions, and we will introduce our proposed model which replaces Merkle tree and provides a more efficient mechanism that requires less time and fewer computations for the verification process.

## Hash chain

The idea of hash chains was first proposed by Lamport to facilitate safeguarding of one time password schemes (OTPs) when the attacker is able to eavesdrop on communications. Since then it has been employed in a wide range of applications, mainly in blockchain. Fig. 3 shows its concept.

We generate a chain of hashes $s^j$ (with $j$ natural number $\geq 0$) by using a hash function $h$. Every element $s^k$ from the hash chain is computed by applying hash function $h$ on the previous element $s^{k-1}$; then we use these outputs in inverse way [2].

One of the most famous and used type of hash chain is binary hash chain or Merkle tree [3]. It is used in many applications including blockchain [4–6], health care [7, 8], financial transactions [9–11], cloud computing [12, 13] and smart grid [14]. Many modified versions of Merkle tree have been introduced to provide better performance. Modified Merkle tree versions have been proposed to provide better time and space [12, 13, 15–17]. All these

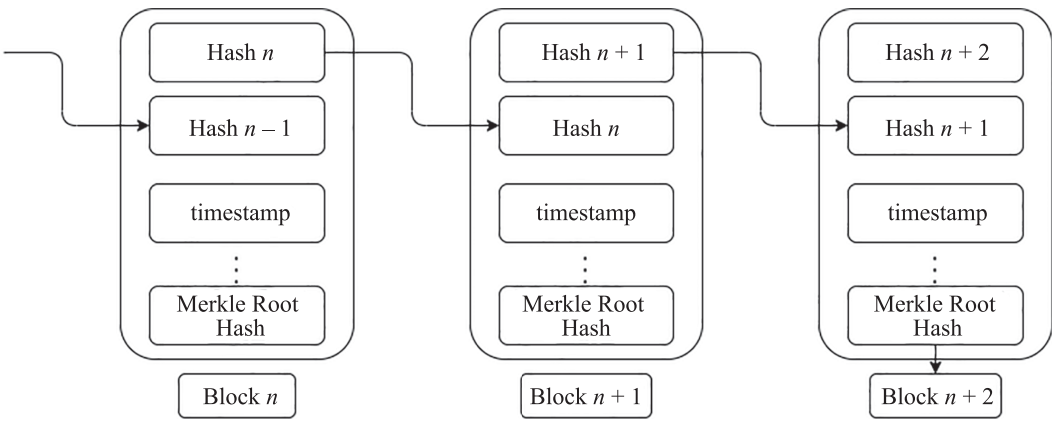



*Fig. 1*. Blockchain basic structure

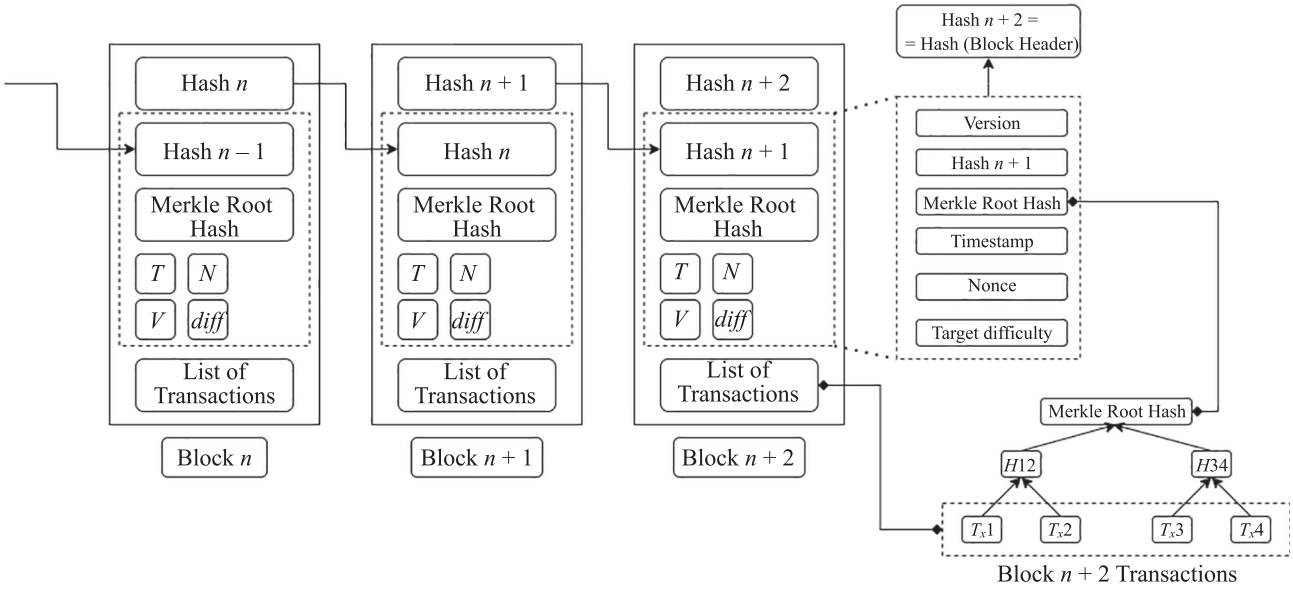



*Fig. 2*. Bitcoin's detailed structure

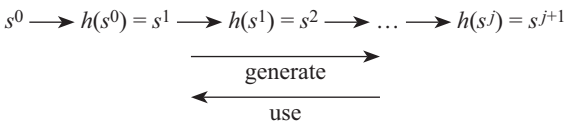



*Fig. 3*. Hash chain basic concept

researches show that Merkle tree plays key role in many applications, and many modifications has been made to match the variety of these applications.

**Merkle tree construction**

In blockchain, every block contains a list of transactions. Merkle tree is constructed over these transactions providing a model to verify integrity of these transactions and that they are in correct order. Therefore, every block has its own Merkle tree presenting all transactions and identifying by Merkle root.

Fig. 4 shows how to construct Merkle tree for a certain block. Initially, all transactions inside the block are hashed using cryptographic hash function, for instance SHA256 as in Bitcoin [1]. After that, every two consecutive hash values are concatenated and then hashed using the same hash function forming their parents.

The same process is performed to the next consecutive hashes and repeated until it becomes a single hash value which is called Merkle root. (If there is an odd number of transactions, last transaction is doubled and its hash is concatenated with itself). Finally, the Merkle root is stored in the block header and distributed to all peers in blockchain network.

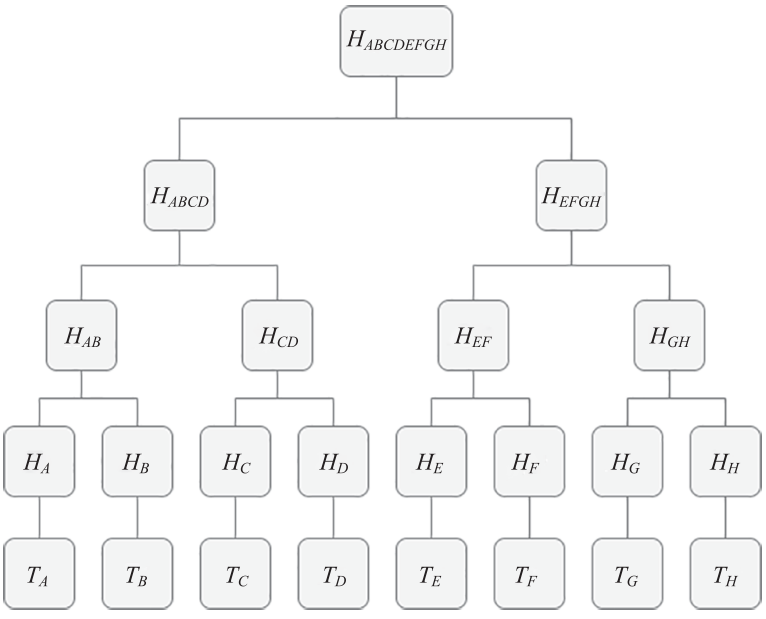



*Fig. 4*. Construction of binary Merkle tree

**Merkle tree verification**

In blockchain networks that used the concept of light nodes which don't store the whole blockchain locally, they just store headers of the blocks. Therefore, they can't verify the authenticity of some transactions by themselves; they have to rely on other trusted full nodes to provide the required data to the verification process.

Fig. 5 shows the process of verification on a certain transaction in a block. Merkle tree allows peers to verify a specific transaction without downloading the whole block data. When a user wants to verify a transaction, he calculates its hash (the black box in Fig. 5), and then he doesn't require the whole Merkle tree, it requires only some hash values from the tree (Merkle branch) in order to be able to verify the integrity of the transaction, as shown in the blue boxes in Fig. 5 for transaction $T_D$.

**Merkle tree analysis**

In our analysis we study time complexity and space requirements for binary Merkle tree to demonstrate the cost of computing the Merkle tree and the required operations to verify block data through Merkle branch.

Let's consider a block with $T$ transactions. Binary Merkle tree for this block has the following attributes:

— The number of leaves is $T$.
— The number of internal Leaves is $T - 1$.
— The total number of nodes is $n = 2T - 1$.
— The height for $n$ nodes is $h = \log_2(n)$.

Consider Merkle tree performance and issue analysis:

1. Construction time complexity

   To construct Merkle tree for $n$ nodes, we simply need to calculate $n$ hash values. Therefore, the construction time complexity is $O(n)$.

2. Adding new node time complexity

   To add a new node Merkle tree for $n$ node, we simply have to recalculate hashes from leaves to root on the right side of tree since the insertion process appends new node to the last node of the tree; so we just need $h$ hash value to be recalculated since $h$ is the height of the tree. Therefore, the construction time complexity is $\log_2(n)$.

3. Verification time complexity

   Verification of the block integrity using Merkle tree requires rebuilding the whole tree again by computing the hash of every transaction in the block and constructing Merkle tree to reach Merkle root; then comparing the computed value with the Merkle root value in the block header (which is considered as reference value). If two values are equal, then the block data is valid, otherwise, it's not valid. This process requires $n$ hash calls. Therefore, the full verification's complexity is $O(n)$.

   We don't need the whole Merkle tree to verify the integrity of a certain transaction in a block; we just need several hashes to do so. It's enough to have number of hashes equal to the tree height. Therefore, the verification time complexity is $O(h)$ which is $O(\log_2(n))$.

4. Space complexity

   To store Merkle tree for $n$ nodes, we simply need to store $n$ hash values. Therefore, the space complexity is $O(n)$, which is considered a large space.

5. Merkle tree issues

   There are some disadvantages in Merkle tree which make it not optimal simulation for blockchain:

— The cost of Merkle tree construction is high, especially when we have a lot of transactions in block (in average, 1626 transactions per block in Bitcoin process during October 2021)[1].
— Blockchain networks don't store Merkle tree. Therefore, full nodes have to construct it and provide Merkle branch every time transaction verification is requested.

[1] Blockchain Explorer — Search the Blockchain | BTC | ETH | BCH, October 2021. https://www.blockchain.com/charts/n-transactions-per-block (accessed: 01.11.2021).

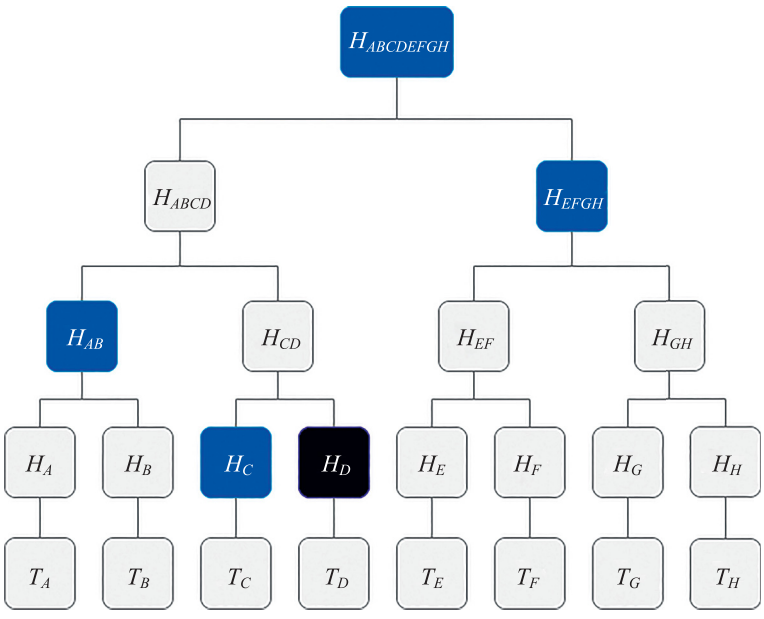



*Fig. 5*. Verification on transaction "$T_D$"

Moreover, it's time consuming to rebuild it again for every request.

— It creates unnecessary network traffic because it's required to transfer Merkle branch to verify one transaction. $L$ network accesses are required to verify one block transactions. If we assume that $m$ users are requesting the verification the same block, then it causes enormous number of network access. Therefore, the complexity of verifying one block (one Merkle tree) is $O(mL\log_2 n)$ that affects network performance.

As a result, Merkle tree has many significant features that make it fundamental for blockchain. However, it has costly data structure and it needs a lot of resources to be constructed. It doesn't require the whole hash tree to be downloaded in order to verify a block of data, instead it requires just a few hash values (Merkle branch) to be able to verify data authenticity, but still, it takes time and resources and needs computing these hashes and also cause unnecessary network traffic. Therefore, we need more efficient mechanism to verify data integrity and authenticity which require less computing and time complexity.

## Probabilistic filter

Probabilistic filters are high-speed, space-efficient data structures that support approximate membership tests with a one-sided error. These filters can claim that a given entry is definitely not represented in a set of entries or might be represented in the set. Therefore, negative responses are conclusive, whereas positive responses incur a small false-positive probability (it might sometimes indicate that an entry is a member of the represented set although it is not). One of the most famous filters is **Bloom filter** which is represented with $m$ bit array.

Some of Bloom filter properties are:

— It allows for membership check in constant space and time.

— Very infrequently it will give a false-positive answer, implies it will say YES if the answer is NO (probably in the set).

— It will never give false-negative answer, implies it will never say NO if the answer is YES (definitely not in the set).

— Basic Bloom filter supports two operations: test and add.

— It has constant time complexity for both adding items and asking whether a key is present or not.

— You can't remove an item from a Bloom filter.

— It also requires much less space compared to the number of items you need to store and check.

We can insert an element in this filter by inserting 1 into $k$ slots in the bit array by $k$ hash functions. When we want to check if a certain element is member in this filter or not, we must check all $k$ slots if they have 1 value; if not, it means that this element is definitely not a member of the filter.

Fig. 6 shows an example of a Bloom filter with $m = 18$ bit array and $k = 3$ hash functions, representing the set $\{x, y, z\}$. The colored arrows show the positions in the bit array that each set element is mapped to. The element $w$ is not in the set $\{x, y, z\}$ because it hashes to one bit-array position containing 0.

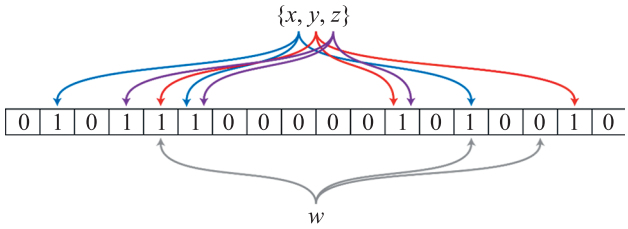



*Fig. 6*. Bloom filter presentation

Let $f$ is the false-positive rate; $n$ is the number of inserted items; $k$ is the number of hash functions; and $m$ is the number of bits in the filter. The following equation determines the false-positive rate as a function of other three parameters [18].

$$f \approx \left(1 - e^{-\frac{nk}{m}}\right)^k. \quad (1)$$

The following equation determines the optimal number of hash functions:

$$k_{opt} = \frac{m}{n}\ln 2. \quad (2)$$

The following equation determines the array size in bits for a given input ($n$) and desired false-positive rate:

$$m = -\frac{n\ln f}{(\ln 2)^2}. \quad (3)$$

We should carefully choose these parameters to optimize the desired Bloom filter. We can get a very low false-positive rate that can be neglected.

1. Construction

   Building cost for a Bloom filter for a block with $L$ transactions is $O(Lk)$, we can consider $O(k) \approx O(1)$ because $k$ is nearly constant.

2. Verification

   Verifying cost for a Bloom filter for a transaction in a block is $O(k)$, because we only need to check $k$ bits in an array.

3. Space

   We just need $m$ bits to store a Bloom filter.

## Incremental hash chain

We proposed to use incremental hash chain to replace Merkle tree by providing more efficient approach to verify integrity of data which consume less time and computation power than Merkle tree.

**Construction**

Block is consisted of many transactions, and in order to construct an incremental hash chain for these transactions in order to verify that these transactions are correct and in the same order, we will start incrementally building our hash chain from the first transaction until the last one.

Let a block has $L$ transactions; $T_i$ presents the transaction with index $i$; $H(T_i)$ is the hash value of transaction $T_i$. To calculate the hash value for $T_i$, we need the transaction concatenated with the hash of previous transaction (except the first transaction), and it's given by equation

$$H(T_i) = \begin{cases} H(T_1);\ i = 1 \\ H(H(T_{i-1})\|T_i);\ 1 < i \le L \end{cases}. \quad (4)$$

The last hash value of equation (4) is the root of the incremental hash value; we call it Incremental Hash Root (INR). This value will be stored in the block header and transmitted to all nodes to be used in the verification process.

**Definition 1.** IHR for a certain block contains $L$ transactions in the incremental hash value of the last transaction of that block, and it's given by the following equation

$$IHR = H(T_n).$$

Equation (4) demonstrates that all transactions are linked together incrementally, and any change to the data or order of transactions will lead to a wrong IHR.

Total hash function calls in a block contain $L$ transactions, i.e. exactly $L$ calls. Therefore, construction time complexity is $O(L)$, while we need $2L–1$ calls in binary Merkle tree. Our approach downsizes computation time to half, so it uses more efficient mechanism and saves power and time.

**Verification**

In our proposed approach we can verify the block data by recomputing IHR again. This process provides overall verification for block data. But when it comes to verify a single transaction in a block, we cannot use our approach to achieve that. Our approach is missing one significant feature that Merkle tree provides, it has partial verification. Therefore, we integrate incremental hash with Bloom filter to achieve this feature.

### Incremental Hash Chain Bloom Filter-based

Merkle tree is costly data structure, and it requires a lot of computations when a blockchain requests a transaction in a block from a full node. The full node should build a Merkle tree for this block and send the transaction with the Merkle branch to the light node. Moreover, this process will be repeated for every single transaction in a block that required a lot of computations and network traffic. We proposed a new mechanism using Incremental Hash Chain Bloom filter-based to verify transactions.

**Miner node side**

Mining nodes are only responsible for creating blocks to add to the blockchain, let's consider a miner builds a new block containing $L$ transactions. He starts with computing hash values for the transactions using equation (4) to generate IHR to be added to the block header. In our approach, it's required to build the Bloom filter for this block by inserting the hash values of the transactions into the filter array, then to compute the hash value of the constructed Bloom filter (let's call this value **BFH**) and to add the resulting hash value to the block header to be used later by light nodes in the verification process for checking the integrity of received Bloom filter from a full node.

**Full node side**

In our approach, block header contains IHR and BFH. When a full node receives a new block from a miner, it will recompute the hash values for all transactions in the block to verify IHR value in the block header; then it will construct Bloom filter for the block and compute hash value for it and compare it with BFH value existing in the block header; and at last recompute the block hash to verify the block data.

When a light node requests a transaction, the full node sends the transaction data, the previous transaction hash, and the Bloom filter.

**Light node side**

A light node requests a transaction and receives the response from a full node. The response contains: transaction data, previous transaction hash and Bloom filter. The light node computes the hash for the Bloom filter and compares it with the BFH in the block header. If they don't match, the node rejects the transaction; if they match, then the node computes the hash of the transaction using equation (4) and gets the transaction hash. After that it checks if this hash value exists in the received filter: if it exists – the transaction is valid and verified, else the light node rejects the transaction.

**Considerations**

The main problem of our approach is that we rely on Probabilistic filter, which doesn't give us a deterministic result; but if we build our filter carefully with choosing the perfect parameters for the filter, we can get a very small false-positive probability which we can neglect.

By using the equations (1), (2) and (3), let us consider Bitcoin where in October 2021[1], in average, there were 1626 transactions per block. As for Ethereum, there were about 74 transactions in a block (during 2021). Let's say we want to present 2000 transaction in a Bloom filter ($m$ = 2000), and we choose the size of the filter as 10 Kbit ($n$ = 10 Kbit) and, applying the previous equations, we can find the results as shown in Fig. 7, *a*.

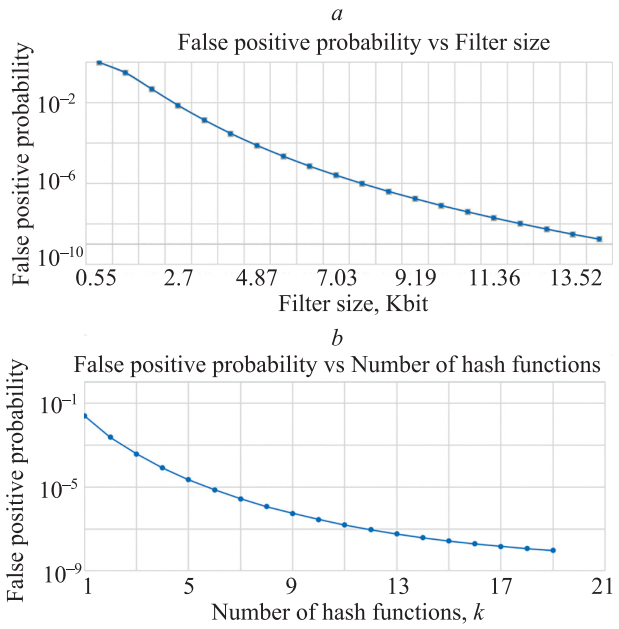



*Fig. 7*. Probability of false alarm depending on: filter size (*a*); the number of hash functions (*b*)

[1] Blockchain Explorer — Search the Blockchain | BTC | ETH | BCH, October 2021. https://www.blockchain.com/charts/n-transactions-per-block (accessed: 01.11.2021).

*Table.* Comparison between binary Merkle tree and our proposed incremental hash chain model

| Feature | Binary Merkle tree | Our approach |
|---|---|---|
| Construction cost | $O(n)$ | $O(L)$ for IHR<br>$O(KL)$ for Bloom filter |
| Verification of a transaction | $O(\log_2 n)$ | $O(K)$ |
| Verification of all transactions | $O(n\log_2 n)$ | $O(L)$ |
| Space cost | $O(n)$ | $O(L)$ |

The false-positive probability is $p = 0.000000982$ using 8 hash functions ($k = 8$), which is considered as neglected value.

We can see from (Fig. 7, *a*, *b*) that we can tune the number of hash functions used in Bloom filter and tune the size of the filter according to the size of the input, and we can get very small value for $p$ which is neglected; also we can have dependence on the Bloom filter to verify the partial verification for a transaction in a block.

## Analysis

Our proposed solution is much faster than binary Merkle tree as demonstrated in Table, it downsizes required computation resources to half. We need $2L–1$ hash calls to construct binary Merkle tree while we only need $L$ calls in our solution; it saves more time and computing power. When it comes to verification process, our approach provides better performance in overall verification when we want to verify block data integrity. Moreover, when it comes to partial verification, our approach gives better performance using $O(K)$ calls to verify a single transaction using Bloom filter.

The big difference in our approach is that we need to build Bloom filter and send it to the light nodes which require transaction verification from this block. But this difficulty replaces the need to compute Merkle branch for every transaction request which is a very cost operation to do. But in our approach we just need to build the filter once and use it with all light nodes which gives better performance and computing size when we are dealing with blocks having big number of transactions (thousands), like Bitcoin does.

**Collision resistance probability**

One of the most import properties in any cryptographic hash mechanism is its resistance to collision which means getting the same hash value for two different inputs. When we want to choose a suitable and secure hash function to be used in our solution, we should consider its collision resistance. Let $H$ is a hash function with $m$ bits output. According to Birthday Paradox [19, 20], the expected hash collision with 50 % probability is accrued when we reach $\sqrt{2^m}$ outputs, for example. If we consider SHA256, since it is used in Bitcoin, we face collision with 50 % probability after getting $2^{128}$ outputs. This means that after getting $2^{128}$ hash values, we would start to get collisions in our system with 50 % probability. Therefore, we should consider the blockchain hash usage rate to be able to predict the required $m$-bit output hash function.

By studying Bitcoin as the first and the most used blockchain network, we find that in average Bitcoin minors generate $\approx 2^{91}$ hashes per year[1], so we need $2^{37}$ years with the same computing platform and power consumption. Therefore, we can safely consider that SHA256 is suitable to our system.

**Disadvantage**

In case there is a false-positive value in the Bloom filter, we cannot figure out where is the problem. In that case we have to request the whole block data (all transactions) from a full node, recompute the IHR and compare it with the IHR in the block header to check the integrity of the whole block data. All that requires a lot of computations and gives a bad performance. However, many recent researches prove that the false-positive probability is negligible [21], and a Bloom filter research with free zones is required [22]. Therefore, we can say that the probability is negligible.

## Conclusion

In this article, we introduce a new approach to replace binary Merkle tree in blockchain by proposing more efficient model using incremental hash chain Bloom filter-based. Our solution consumes less computing power than binary Merkle tree. Moreover, it needs less time and space to construct the model and verify the integrity of blockchain data. We compare our mode with binary Merkle tree and prove that our model is more efficient in every aspect.

[1] Blockchain Explorer — Search the Blockchain | BTC | ETH | BCH, October 2021. https://www.blockchain.com/charts/n-transactions-per-block (accessed: 01.11.2021).

**References**

1. Nakamoto S. Bitcoin: A peer-to-peer electronic cash system. *Decentralized Business Review*, 2008, pp. 21260.
2. Lamport L. Password authentication with insecure communication. *Communications of the ACM*, 1981, vol. 24, no. 11, pp. 770–772. https://doi.org/10.1145/358790.358797
3. Merkle R.C. A digital signature based on a conventional encryption function. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 1988, vol. 293, pp. 369–378. https://doi.org/10.1007/3-540-48184-2_32
4. Wang S., Ouyang L., Yuan Y., Ni X., Han X., Wang F.-Y. Blockchain-enabled smart contracts: architecture, applications, and future trends. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2019, vol. 49, no. 11, pp. 2266–2277. https://doi.org/10.1109/TSMC.2019.2895123
5. Das K., Bera B., Saha S., Kumar N., You I., Chao H.-C. AI-envisioned blockchain-enabled signature-based key management scheme for industrial cyber-physical systems. *IEEE Internet of Things Journal*, 2022, vol. 9, no. 9, pp. 6374–6388. https://doi.org/10.1109/JIOT.2021.3109314
6. Sharma P., Jindal R., Borah M.D. Blockchain technology for cloud storage: A systematic literature review. *ACM Computing Surveys*, 2020, vol. 53, no. 4, pp. 3403954. https://doi.org/10.1145/3403954
7. Hariharasitaraman S., Balakannan S.P. A dynamic data security mechanism based on position aware Merkle tree for health rehabilitation services over cloud. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 2019, in press. https://doi.org/10.1007/s12652-019-01412-0
8. Alzubi J.A. Blockchain-based Lamport Merkle Digital Signature: Authentication tool in IoT healthcare. *Computer Communications*, 2021, vol. 170, pp. 200–208. https://doi.org/10.1016/j.comcom.2021.02.002
9. Dhumwad S., Sukhadeve M., Naik C., Manjunath K.N., Prabhu S. A peer to peer money transfer using SHA256 and Merkle tree. *Proc. of the 23rd Annual International Conference in Advanced Computing and Communications (ADCOM)*, 2017, pp. 40–43. https://doi.org/10.1109/ADCOM.2017.00013
10. Zhang D., Le J., Mu N., Liao X. An anonymous off-blockchain micropayments scheme for cryptocurrencies in the real world. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2020, vol. 50, no. 1, pp. 32–42. https://doi.org/10.1109/TSMC.2018.2884289
11. Ojetunde B., Shibata N., Gao J. Secure payment system utilizing MANET for disaster areas. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2019, vol. 49, no. 12, pp. 2651–2663. https://doi.org/10.1109/TSMC.2017.2752203
12. Zhou Z., Wang B., Dong M., Ota K. Secure and efficient vehicle-to-grid energy trading in cyber physical systems: Integration of blockchain and edge computing. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2020, vol. 50, no. 1, pp. 43–57. https://doi.org/10.1109/TSMC.2019.2896323
13. Mao J., Zhang Y., Li P., Li T., Wu Q., Liu J. A position-aware Merkle tree for dynamic cloud data integrity verification. *Soft Computing*, 2017, vol. 21, no. 8, pp. 2151–2164. https://doi.org/10.1007/s00500-015-1918-8
14. Li H., Lu R., Zhou L., Yang B., Shen X. An efficient Merkle-tree-based authentication scheme for smart grid. *IEEE Systems Journal*, 2014, vol. 8, no. 2, pp. 655–663. https://doi.org/10.1109/JSYST.2013.2271537
15. Jakobsson M., Leighton T., Micali S., Szydlo M. Fractal Merkle tree representation and traversal. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 2003, vol. 2612, pp. 314–326. https://doi.org/10.1007/3-540-36563-X_21
16. Buchmann J., Dahmen E., Schneider M. Merkle tree traversal revisited. Lecture Notes in Computer Science (including subseries *Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 2008, vol. 5299, pp. 63–78. https://doi.org/10.1007/978-3-540-88403-3_5
17. Chelladurai U., Pandian S. HARE: A new hash-based authenticated reliable and efficient Modified Merkle Tree data structure to ensure integrity of data in the healthcare systems. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 2021, in press. https://doi.org/10.1007/s12652-021-03085-0

**Литература**

1. Nakamoto S. Bitcoin: A peer-to-peer electronic cash system // Decentralized Business Review. 2008. P. 21260.
2. Lamport L. Password authentication with insecure communication // Communications of the ACM. 1981. V. 24. N 11. P. 770–772. https://doi.org/10.1145/358790.358797
3. Merkle R.C. A digital signature based on a conventional encryption function // Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). 1988. V. 293. P. 369–378. https://doi.org/10.1007/3-540-48184-2_32
4. Wang S., Ouyang L., Yuan Y., Ni X., Han X., Wang F.-Y. Blockchain-enabled smart contracts: architecture, applications, and future trends // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems. 2019. V. 49. N 11. P. 2266–2277. https://doi.org/10.1109/TSMC.2019.2895123
5. Das K., Bera B., Saha S., Kumar N., You I., Chao H.-C. AI-envisioned blockchain-enabled signature-based key management scheme for industrial cyber-physical systems // IEEE Internet of Things Journal. 2022. V. 9. N 9. P. 6374–6388. https://doi.org/10.1109/JIOT.2021.3109314
6. Sharma P., Jindal R., Borah M.D. Blockchain technology for cloud storage: A systematic literature review // ACM Computing Surveys. 2020. V. 53. N 4. P. 3403954. https://doi.org/10.1145/3403954
7. Hariharasitaraman S., Balakannan S.P. A dynamic data security mechanism based on position aware Merkle tree for health rehabilitation services over cloud // Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing. 2019. in press. https://doi.org/10.1007/s12652-019-01412-0
8. Alzubi J.A. Blockchain-based Lamport Merkle Digital Signature: Authentication tool in IoT healthcare // Computer Communications. 2021. V. 170. P. 200–208. https://doi.org/10.1016/j.comcom.2021.02.002
9. Dhumwad S., Sukhadeve M., Naik C., Manjunath K.N., Prabhu S. A peer to peer money transfer using SHA256 and Merkle tree // Proc. of the 23rd Annual International Conference in Advanced Computing and Communications (ADCOM). 2017. P. 40–43. https://doi.org/10.1109/ADCOM.2017.00013
10. Zhang D., Le J., Mu N., Liao X. An anonymous off-blockchain micropayments scheme for cryptocurrencies in the real world // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems. 2020. V. 50. N 1. P. 32–42. https://doi.org/10.1109/TSMC.2018.2884289
11. Ojetunde B., Shibata N., Gao J. Secure payment system utilizing MANET for disaster areas // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems. 2019. V. 49. N 12. P. 2651–2663. https://doi.org/10.1109/TSMC.2017.2752203
12. Zhou Z., Wang B., Dong M., Ota K. Secure and efficient vehicle-to-grid energy trading in cyber physical systems: Integration of blockchain and edge computing // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems. 2020. V. 50. N 1. P. 43–57. https://doi.org/10.1109/TSMC.2019.2896323
13. Mao J., Zhang Y., Li P., Li T., Wu Q., Liu J. A position-aware Merkle tree for dynamic cloud data integrity verification // Soft Computing. 2017. V. 21. N 8. P. 2151–2164. https://doi.org/10.1007/s00500-015-1918-8
14. Li H., Lu R., Zhou L., Yang B., Shen X. An efficient Merkle-tree-based authentication scheme for smart grid // IEEE Systems Journal. 2014. V. 8. N 2. P. 655–663. https://doi.org/10.1109/JSYST.2013.2271537
15. Jakobsson M., Leighton T., Micali S., Szydlo M. Fractal Merkle tree representation and traversal // Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). 2003. V. 2612. P. 314–326. https://doi.org/10.1007/3-540-36563-X_21
16. Buchmann J., Dahmen E., Schneider M. Merkle tree traversal revisited // Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). 2008. V. 5299. P. 63–78. https://doi.org/10.1007/978-3-540-88403-3_5
17. Chelladurai U., Pandian S. HARE: A new hash-based authenticated reliable and efficient Modified Merkle Tree data structure to ensure integrity of data in the healthcare systems // Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing. 2021. in press. https://doi.org/10.1007/s12652-021-03085-0

18. Luo L., Guo D., Ma R.T.B., Rottenstreich O., Luo X. Optimizing bloom filter: Challenges, solutions, and comparisons. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 2019, vol. 21, no. 2, pp. 1912–1949. https://doi.org/10.1109/COMST.2018.2889329
19. Suzuki K., Tonien D., Kurosawa K., Toyota K. Birthday paradox for multi-collisions. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 2006, vol. 4296, pp. 29–40. https://doi.org/10.1007/11927587_5
20. Gilbert H., Handschuh H. Security analysis of SHA-256 and sisters. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 2004, vol. 3006, pp. 175–193. https://doi.org/10.1007/978-3-540-24654-1_13
21. Lee D., Park N. Blockchain based privacy preserving multimedia intelligent video surveillance using secure Merkle tree. *Multimedia Tools and Applications*, 2021, vol. 80, no. 26-27, pp. 34517–34534. https://doi.org/10.1007/s11042-020-08776-y
22. Kiss S.Z., Hosszu É., Tapolcai J., Rónyai L., Rottenstreich O. Bloom filter with a false positive free zone. *IEEE Transactions on Network and Service Management*, 2021, vol. 18, no. 2, pp. 2334–2349. https://doi.org/10.1109/TNSM.2021.3059075

18. Luo L., Guo D., Ma R.T.B., Rottenstreich O., Luo X. Optimizing bloom filter: Challenges, solutions, and comparisons // IEEE Communications Surveys and Tutorials. 2019. V. 21. N 2. P. 1912–1949. https://doi.org/10.1109/COMST.2018.2889329
19. Suzuki K., Tonien D., Kurosawa K., Toyota K. Birthday paradox for multi-collisions // Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). 2006. V. 4296. P. 29–40. https://doi.org/10.1007/11927587_5
20. Gilbert H., Handschuh H. Security analysis of SHA-256 and sisters // Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). 2004. V. 3006. P. 175–193. https://doi.org/10.1007/978-3-540-24654-1_13
21. Lee D., Park N. Blockchain based privacy preserving multimedia intelligent video surveillance using secure Merkle tree // Multimedia Tools and Applications. 2021. V. 80. N 26-27. P. 34517–34534. https://doi.org/10.1007/s11042-020-08776-y
22. Kiss S.Z., Hosszu É., Tapolcai J., Rónyai L., Rottenstreich O. Bloom filter with a false positive free zone // IEEE Transactions on Network and Service Management. 2021. V. 18. N 2. P. 2334–2349. https://doi.org/10.1109/TNSM.2021.3059075

## Authors

**Maher A. Maalla** — Student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, https://orcid.org/0000-0002-4806-8608, maher.malla7@gmail.com
**Sergey V. Bezzateev** — D. Sc., Associate Professor, Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation; Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Head of Department, Saint Petersburg, 190000, Russian Federation, SC 6602425996, https://orcid.org/0000-0002-0924-6221, bsv@aanet.ru

## Авторы

**Маалла Махер Аднан** — студент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, https://orcid.org/0000-0002-4806-8608, maher.malla7@gmail.com
**Беззатеев Сергей Валентинович** — доктор технических наук, доцент, профессор, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация; заведующий кафедрой, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, 190000, Российская Федерация, SC 6602425996, https://orcid.org/0000-0002-0924-6221, bsv@aanet.ru

*Received 09.02.2022*
*Approved after reviewing 24.03.2022*
*Accepted 15.05.2022*

*Статья поступила в редакцию 09.02.2022*
*Одобрена после рецензирования 24.03.2022*
*Принята к печати 15.05.2022*

Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ
май–июнь 2022 Том 22 № 3 http://ntv.ifmo.ru/
SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL OF INFORMATION TECHNOLOGIES, MECHANICS AND OPTICS
May–June 2022 Vol. 22 No 3 http://ntv.ifmo.ru/en/
ISSN 2226-1494 (print) ISSN 2500-0373 (online)

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК УНИВЕРСИТЕТ ИТМО
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ

doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-3-547-558
УДК 004.932.2

# Метод генерации масок на изображениях лиц и системы их распознавания

**Георгий Александрович Кухарев[1], Елена Витальевна Рюмина[2]✉, Никита Александрович Шульгин[3]**

[1,3] Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, 197376, Российская Федерация
[2] Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук, Санкт-Петербург, 199178, Российская Федерация

[1] gakukharev@etu.ru, https://orcid.org/0000-0003-2188-2172
[2] ryumina_ev@mail.ru✉, https://orcid.org/0000-0002-4135-6949
[3] nikitashulgin@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-1884-5832

**Аннотация**

**Предмет исследования.** Исследована проблема распознавания лиц в масках. Показано, что разнообразные по форме, текстуре и цвету реальные маски создают проблемы для современных систем распознавания изображений лиц. Одна из таких причин — отсутствие необходимых реальных наборов обучающих данных. Создание новых данных на базе простых методов формирования масок на изображениях лиц может решить эту проблему. **Метод.** Предложен оригинальный метод, включающий генерацию различных типов, форм и цветов масок непосредственно на оригинальной текстуре изображений лиц. При этом учитывалось формирование масок на лицах отдельных людей, лицах в групповых фото и в сценах с потоками людей. **Основные результаты.** На основе 100 оригинальных изображений лиц из базы «CUHK Face Sketch Database» создана тестовая база, которая включает в себя более 20 000 изображений лиц с масками, доступных для использования. Выполнены эксперименты по распознаванию лиц тестовой базы в рамках реализованных четырех систем: трех современных на базе «глубокого обучения» и одной детерминированной — на базе косинус-преобразования. Оценена результативность этих систем, интерпретированы полученные результаты распознавания лиц в масках и отмечены маски, которые были проблемой для выбранных систем. **Практическая значимость.** Предложенный метод генерации масок может быть использован для создания баз данных и тестовых баз изображений с масками. Полученные результаты будут полезны исследователям и специалистам в области обработки и анализа изображений.

**Ключевые слова**

генерация масок, распознавание изображений лиц, антропометрия лица, нейросети, экстрактор признаков, метрика косинусного подобия, критерий минимального расстояния

**Благодарности**

Работа выполнена при поддержке проекта фонда РФФИ № 20-04-60529-вирусы, а также частично в рамках бюджетной темы № FFZF-2022-0005.

**Ссылка для цитирования:** Кухарев Г.А., Рюмина Е.В., Шульгин Н.А. Метод генерации масок на изображениях лиц и системы их распознавания // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2022. Т. 22, № 3. С. 547–558. doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-3-547-558

# Method for generating masks on face images and systems for their recognition

**Georgy A. Kukharev[1], Elena V. Ryumina[2]✉, Nikita A. Shulgin[3]**

[1,3] Saint Petersburg State Electrotechnical University “LETI”, Saint Petersburg, 197376, Russian Federation
[2] Saint Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS), Saint Petersburg, 199178, Russian Federation

[1] gakukharev@etu.ru; https://orcid.org/0000-0003-2188-2172
[2] ryumina_ev@mail.ru✉, https://orcid.org/0000-0002-4135-6949
[3] nikitashulgin@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-1884-5832

© Кухарев Г.А., Рюмина Е.В., Шульгин Н.А., 2022

**Abstract**
The problem of masked face recognition is investigated. It is shown that real masks of various shapes, textures and colors have become a problem for state-of-the-art face recognition systems. A reason for this is the lack of the necessary real training datasets. Creation of new data based on simple methods of forming masks on face images could solve this problem. An original method is proposed including the generation of various types, shapes, and colors of masks directly on the original texture of face images. The formation of the masks on the faces of individuals, on faces in group photos, and in scenes with streams of people was taken into account. Based on 100 original face images from the CUHK Face Sketch Database, a test database was created that includes more than 20,000 masked faces images which available for use. Experiments were carried out to recognize faces from the test database within the implemented four systems, among which three are state-of-the-art systems based on "deep learning" and one is deterministic system based on the cosine-transform. The performance of these systems was evaluated, the obtained results of masked face recognition were interpreted, and the masks that were a problem for selected four systems were noted. The proposed mask generation method can be used to create corpora and test databases of images with masks. The obtained results will be useful to researchers and specialists in the field of image processing and analysis.

**Keywords**
masks generation, face images recognition, facial anthropometry, neural networks, feature extractor, cosine similarity metric, minimum distance criterion

**Acknowledgements**
The work was supported by the RFBR project No. 20-04-60529-viruses, and also partially under the budget topic No. FFZF-2022-0005.

**For citation:** Kukharev G.A., Ryumina E.V., Shulgin N.A. Method for generating masks on face images and systems for their recognition. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2022, vol. 22, no. 3, pp. 547–558 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-3-547-558

## Введение

Лица людей в медицинских (гигиенических) масках с 2019 года стали реальностью нашей повседневной жизни, вошедшей в эпоху «COVID» пандемии. При этом контроль ношения масок остается необходимой процедурой в общественных местах.

Задача контроля наличия медицинской (гигиенической) маски на лицах стала первым серьезным вызовом и проблемой для ее решения. Еще задолго до «COVID» пандемии на эту проблему обратили внимание в Китайской Академии Наук [1], поскольку маски в Китае использовали для защиты людей от дыма и гари атмосферного воздуха. И, если для медицинских (гигиенических – белых и светлых) масок на лицах анфас эта задача решалась относительно легко, то для замаскированных лиц в реальных ситуациях и условиях («Masked Faces in the Wild» [1]) поиск решений достигался очень трудно. Эти решения опирались на сбор и создание специальных тестовых баз изображений лиц в масках и проведение множества исследований, учитывающих специфику и характеристики таких изображений [2]. Кроме задачи контроля наличия защитной маски на лицах, существует задача распознавания изображений лиц (РИЛ) в масках. Решению задач РИЛ в последнее время также уделяется большое внимание [3].

Отметим, что стандартные гигиенические светло-голубые медицинские маски — не единственное средство индивидуальной защиты. Для целей защиты люди активно используют и тканевые маски. Тканевые маски могут быть разной текстуры, формы и цветовой гаммы (однотоновой или многотоновой), с QR-кодами и надписями, а также с изображениями морд различных животных и голов птиц. Использование таких масок стало проблемой для современных систем наблюдения и систем контроля доступа (например, в метро, аэропортах и других объектах массового нахождения людей), построенных на базе методов машинного обучения и, в том числе методов глубокого обучения.

Для создания надежных систем контроля наличия защитных масок и РИЛ в них, были собраны новые наборы изображений лиц в масках и базы с искусственными масками [4]. Например, на платформах MaskTheFace[1] и AIZOOTech/FaceMaskDetection[2] «маски выбирались» из специального репозитория масок и буквально «пристраивались» к нижней области лица — от периорбитальной области до конца подбородка.

В отличие от изображений лиц в медицинских гигиенических масках, лица с реальными цветными текстурными масками практически не распознавались в ранних системах глубокого обучения. При этом хуже всего распознавались лица с масками черного, сине-черного-серого, темно-серого и красного цветов, маски с изображениями животных и птиц, закрывающие всю нижнюю часть лица. Об этом свидетельствует отчет NIST [5]. Кроме этих типов масок, также не всегда распознавались лица в прозрачных защитных масках и щитах на периорбитальной области, что возникало из-за их отражающей засветки приемной фотоаппаратуры.

## Цель и содержание работы

Разнообразие вариантов используемых на практике масок, привели к тому, что в вопросах РИЛ в масках все еще нет единого мнения, решений и рекомендаций. Исходя из этого, в настоящей работе будут рассмотрены маски только на лицах анфас и в сценариях, используемых в системах контроля доступа (доступ к финан-

[1] MaskTheFace [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://sites.google.com/view/masktheface/home/ (дата обращения: 20.03.2022).

[2] AIZOOTech/FaceMaskDetection [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://github.com/AIZOOTech/FaceMaskDetection/actions/ (дата обращения: 20.03.2022).

совым ресурсам, закрытым лабораториям, контроль пассажиропотока в аэропортах и вокзалах и, наконец, контроль потока туристов и беженцев на пограничных пунктах [6]). Люди, участвующие в этих сценариях, хотят, чтобы «система их узнала» и, поэтому положение лиц анфас является для этих людей не только мотивированным, но и необходимым для формально правильного интерактива с системой контроля доступа.

Предложен метод генерации различных форм, типов и цветов масок и метод их размещения/формирования на лицах, который реализуется непосредственно на оригинальной текстуре изображений лиц. Такой способ реализации создает высокую реалистичность положения и органичность нахождения масок на лицах. При этом маски легко формируются как на отдельных портретах людей и выделенных кадров видео, так и на групповых фото и лицах в сценах с потоками людей.

Корректное размещение/формирование масок на лицах основано на ключевых точках лица, которые вычисляются в онлайн-режиме, и используемых мнемонических моделей масок. Предложенный метод формирования масок не зависим от размеров изображений-оригиналов, фенотипа лиц и фона изображения, а также от точного положения лиц анфас. Метод может применяться с видимыми отклонениями от положения лиц анфас. Эти отклонения могут выражаться в плоском и пространственном поворотах лиц, которые обычно присутствуют на групповых снимках и сценах с потоками людей. Применение метода возможно со многими известными базами изображений лиц.

Отметим, что метод не требует использования специальных репозиториев масок и применяет изображения 6 форм масок, 10 оригинальных цветных тканевых текстур и 15 текстур типовых масок (15 штампов масок). Текстура генерируемых масок образуется путем замены или перестановки компонент (R, G и B) цветной оригинальной тканевой текстуры, другими компонентами R, G и B — из штампов масок, из другой цветной тканевой текстуры.

В работе представлены варианты сгенерированных таким образом масок на лицах, которые практически не отличаются от реальных масок (REAL MASKS) и значительно превосходят поддельные маски (например, «печатные маски» [5] или SIMULATED MASKS [7]). В качестве исходных изображений-оригиналов использованы, как пример, 100 изображений лиц из базы «CUHK Face Sketch Database» (CUFS)[1]. На их основе сгенерировано более 20 000 изображений лиц в масках различных типов, форм, текстуры и цвета[2]. Выполнены эксперименты по распознаванию лиц из базы CUFS в рамках четырех систем, среди которых три — современные на базе глубокого обучения и одна — детерминированная на базе косинус-преобразования. Оценена результативность выбранных систем, интерпретированы полученные результаты распознавания лиц в масках и отмечены маски, которые были проблемой для всех систем.

## Последние достижения по распознаванию изображений лиц в масках на базе глубокого обучения

Сравнительный анализ новых решений проблемы РИЛ в масках был рассмотрен на конференции по компьютерному зрению (The International Conference on Computer Vision — 2021 [8, 9]). Организаторы конференции получили сотни заявок на участие, что подтвердило актуальность и необходимость поиска решений проблемы РИЛ в масках. Представим краткие результаты рассмотренного анализа и наилучших решений проблемы РИЛ.

Отметим, что при решении проблемы РИЛ без масок сложилась четкая тенденция использования методов глубокого обучения [10], которые также применяются для РИЛ в масках [11]. Решение проблемы РИЛ в/без масок состоит из двух основных компонентов. Первым компонентом является детектор лиц, их сравнение представлено в работе [2]. Исследование показало, что RetinaFace [12] лучше остальных работает на изображениях лиц в масках в реальных ситуациях и условиях. Второй компонент — экстрактор признаков и соответствующая для него предварительная обработка (например, выравнивание лиц, нормализация изображений и т. д.). Из [11] прослеживаются два наиболее популярных экстрактора: на основе семейства ResNet [13] и VGG-16 [14]. Эти и подобные экстракторы признаков предварительно обучаются на крупных наборах данных изображений лиц и предоставляются в открытый доступ, например, в библиотеках DeepFace [15], Keras-VGGFace[3] и др. Учитывая вышесказанное в настоящей работе в качестве нейросетевых систем использованы экстракторы признаков: ArgFace, ResNet и VGG-16 [12–14].

## Метод генерации и размещения/формирования масок на изображении лиц людей

На первом (предварительном) этапе из исходной сцены детектируется и выделяется лицо человека, а далее на нем определяются координаты антропометрических точек лица. Определение координат основано на алгоритмах, рассмотренных в работах [16, 17]. Программная реализация алгоритмов представлена, например, в библиотеках OpenCV[4] и Dlib[5]. Пример полученных 68-и антропометрических точек показан на рис. 1, *а*. Здесь и далее используются изображения лиц из базы CUFS. Из исходного набора в 68 координат

[1] CUHK Face Sketch Database (CUFS) [Электронный ресурс]. http://mmlab.ie.cuhk.edu.hk/archive/facesketch.html (дата обращения: 20.03.2022).

[2] База изображений фронтальных лиц в масках [Электронный ресурс]. https://hci.nw.ru/ru/pages/masked-frontal-faces (дата обращения: 13.04.2022).

[3] Keras-vggface [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://github.com/rcmalli/keras-vggface (дата обращения: 20.03.2022).

[4] OpenCV [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://opencv.org/ (дата обращения: 20.03.2022).

[5] Dlib [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://dlib.net/face_landmark_detection.py.html (дата обращения: 20.03.2022).

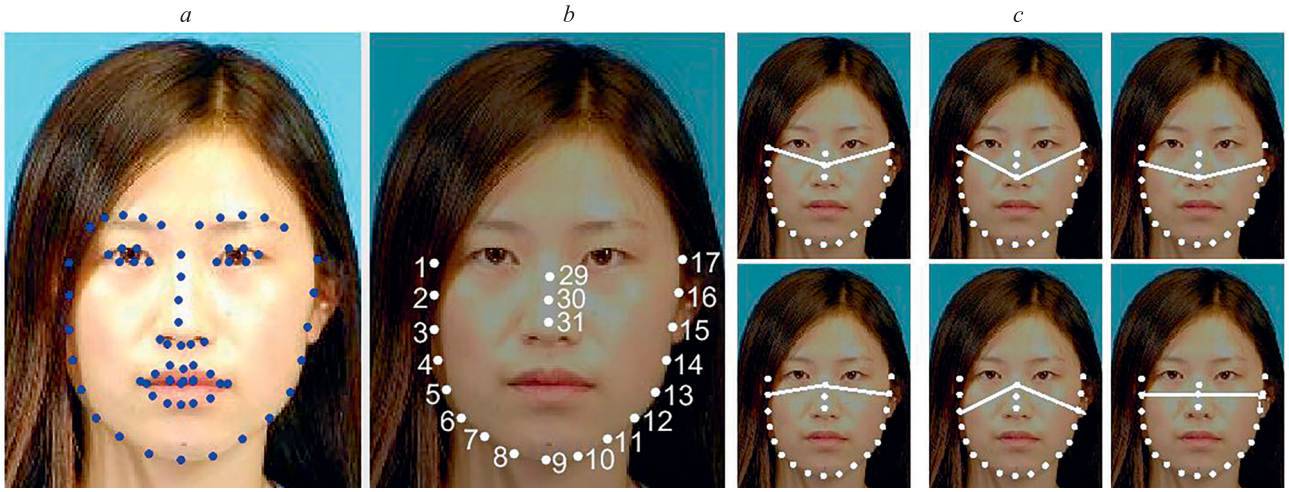



*Рис. 1*. Идеи метода генерации масок на области лица: исходное изображение лиц с ключевыми точками (*a*); 20 ключевых точек, определяющих границы контура масок (*b*); шесть контуров масок, полученных по выбранным ключевым точкам (*c*)

*Fig. 1*. Ideas for the mechanism of the masks appearance in the face area: initial face images with keypoints (*a*); 20 keypoints defining the border of the mask contour (*b*); six contours of masks coming from selected keypoints (*c*)

антропометрических точек использовано только 20 координат: три из них на линии симметрии носа (с номерами 29–31) и 17 — с номерами 1–17, охватывающими овал лица. 20 ключевых точек показаны на рис. 1, *b*.

Верхняя часть контура каждой формируемой маски определяется выбранной координатой на линии симметрии носа и двумя координатами с левой и правой стороны овала лица. Оставшиеся координаты овала лица определяют нижнюю часть контура формируемой маски.

Шесть вариантов контуров масок показаны на рис. 1, *c*. Каждый контур масок можно мнемонически описать следующими цепочками точек: {29, 3–15, 29}; {29, 2–16, 29}; {30, 2–16, 30}; {30, 1–17, 30}; {31, 1–17, 31}; {30, 2–16, 30}. При этом запись типа «3–15» включает все промежуточные точки овала лица — от начальной (3) до конечной (15). Используя такую мнемоническую модель, можно легко отобразить контур формируемой маски в прямоугольной «матричной системе координатных осей», в которой: начало координат находится в левом верхнем углу; вертикальная ось нумеруется сверху вниз; а горизонтальная ось — слева направо. Такая система координатных осей соответствует столбцам и строкам пикселов на лицах анфас, что позволяет просто и точно сформировать на нем не только контур маски, но и саму маску.

Процесс формирования маски на лице представлен на рис. 2 и включает следующие этапы:

— определение границ поля маски по четырем ключевым точкам: первая — на горбинке носа по линии симметрии лица, вторая — на нижней точке подбородка и две точки на охвате овала по линии козелка уха (рис. 2, *a*);
— замещение поля маски автоматически сгенерированной текстурой маски с отображением на ней ребра и тени (возникающей при боковом освещении лица), а также размещение ключевых точек исходной мнемонической модели для проверки возможности размещения формируемой маски (рис. 2, *b*);
— прорисовка контура маски, для отображения областей лица, выходящих за внешние границы маски, и укрытых текстурой (рис. 2, *c*);

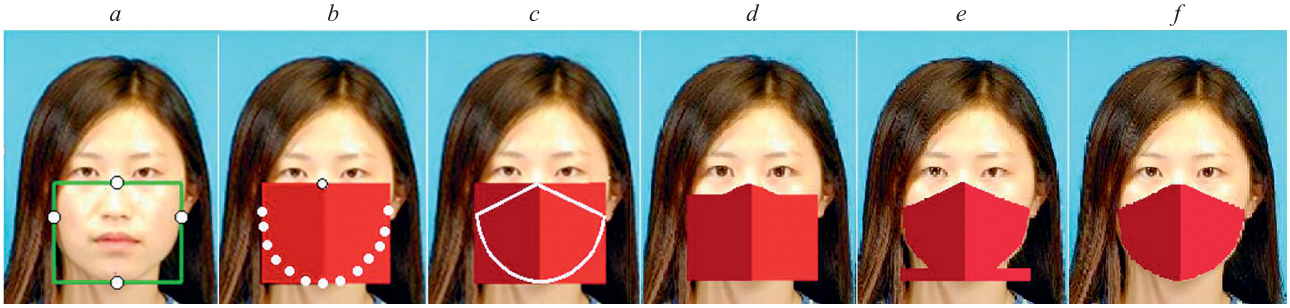



*Рис. 2*. Процесс формирования маски: определение границ поля для маски (*a*); замещение области поля текстурой маски, отображение ребра и теней маски, а также размещение точек контура маски (*b*); прорисовка контура формируемой маски (*c*); восстановление пикселов изображений лиц, укрытых текстурой (*d–f*)

*Fig. 2*. The process of mask formation: determination of the field boundaries for the mask (*a*); replacing the field area with the mask texture, displaying the edge and shadows of the mask as well as placing the points of the mask outline (*b*); drawing the contour of the mask being formed (*c*); restoration of face images pixels covered with a texture (*d–f*)

— восстановление тех пикселов изображений лиц, которые укрыты текстурой, выходящей за внешние границы контура маски. При этом само восстановление пикселов реализуется как замена значений пикселов текстуры на значения пикселов исходного изображений лиц (рис. 2, *d–f*).

В предлагаемом решении расчет координат пикселов выполняется по методу определения положения точки относительно многоугольника. В основе метода лежит алгоритм 112 **«Position of point relative to polygon»** [18]. После его проверки и уточнения он был представлен в отечественных сборниках алгоритмов в языках АЛГОЛ [19] и Бейсик [20]. Соответствующая процедура на языке пакета MATLAB, реализующая указанный алгоритм, представлена в работе [21].

Рассмотрим случай, когда в поле границ маски (рис. 2, *a*) расположен многоугольник — контур маски (рис. 2, *c*). В этом случае используются пикселы, находящиеся в поле границ маски, но не входящие в ее контур. Исходные данные для расчета координат интересующих пикселов — координаты контура маски, представленные в форме мнемонической модели. Весь набор просматриваемых координат пикселов определяется габаритными размерами поля маски. Просматривая пикселы в прямоугольной сетке (от левого верхнего угла до нижнего правого угла поля маски), найдем все координаты пикселов, удовлетворяющие условию решаемой задачи. Например, поле маски в представленном случае на рис. 1, *a* имеет размер 89 × 114 пикселов, при размере исходного изображения 250 × 200. А число восстанавливаемых пикселов составляет 3307 из просмотренных 10 146.

Перейдем к этапу восстановления пикселов. Число замен пикселов при этом будет равно 3307. Процесс восстановления (по факту замены) пикселов лица представлен в последовательности скриншотов на рис. 2, *d–f*.

В рамках предлагаемого метода формирования масок можно изменять текстуру и цвета масок, фон портрета и кожи лица, а также форму масок (в соответствии с мнемонической моделью), тип масок (непрозрачные, прозрачные, с закрытой областью глаз прозрачным щитком) и положение масок в нижней области лица. Изображения лиц в маске могут быть представлены не только в исходном формате (например, RGB), но и в любых других пяти форматах (RBG, GRB, GBR, BRG, BGR), основанных на перестановках компонент R, G и B. Это позволяет в 6 раз расширить цветовую гамму отдельно изображений лиц и масок, а также изображения лиц в масках при одном и том же наборе исходных изображений без масок — т. е. эталонов.

На рис. 3 представлены некоторые варианты типа масок, их формы, текстур и цвета, а также варианты различной цветовой гаммы кожи лиц и фона. Более полный набор масок представлен по адресу[1].

Отметим также, что при небольших *плоских и пространственных поворотах лица* в рамках матричной системы координат, контуры масок и сами маски формируются без искажений (рис. 4).

На рис. 5 представлены изображения лиц при плоских и пространственных поворотах в масках (SIMULATED MASKS) из баз данных [7, 22].

При сравнении изображений лиц в масках (рис. 4–5), видно, что предложенный в настоящей работе метод генерации масок корректно и строго по овалу лица размещает маски в отличии от других state-of-the-art методов.

В предлагаемую базу включены изображения лиц в масках с размытой или сглаженной текстурой лица, а также с наложенным на них шумом. Полученные изображения имитируют реальные условия получения исходных данных в условиях удаленности от камеры, дождя и/или снега в рамках систем уличного наблюдения. Фактически, получены изображения лиц в масках при полностью искаженной области лица. Отметим, что в работе представляет интерес только область лица, не укрытая маской, но она также не соответствует аналогичной области на лице эталона из-за изменения оригинальных значений пикселов при сглаживании и зашумлении открытых областей лица. Заметим, что в существующих базах данных изображений лиц в масках вряд ли можно встретить такие наборы обучающих и тестовых данных.

### Детерминированная система, использованная в эксперименте

Выше было отмечено, что современные системы РИЛ реализуются на методах глубокого обучения. Однако для РИЛ применимы и простые системы на основе детерминированных методов. Класс простых систем (Simple Face Recognition Systems, Simple FaReS) представлен в монографии [23]. В настоящей работе модель детерминированной системы имеет следующий вид:

$$\textbf{GUFS}(100/1/\text{NUM})\{\textbf{2DDCT:}\ M \times N \rightarrow P \times P/\text{zigzag}\} \times \times [\textbf{KMP}/\text{L1/rank=1}], \quad (1)$$

где **GUFS**(100/1/NUM) — база изображений лиц **GUFS**, включающая 100 эталонов (по 1 эталону на класс) и NUM тестовых изображений лиц в масках (при этом NUM кратно 100); **2DDCT:** $M \times N \rightarrow P \times P$/zigzag} — блок обработки изображений лиц: изображение размером $M \times N$ подвергается двумерному косинус-преобразованию, с выбором признаков методом «zigzag» по $P$ диагоналям спектральной матрицы размером $P \times P$ и общим числом признаков, равным $(P(P + 1)/2)–1)$; [**KMP**/L1/rank=1] — классификатор: реализует процедуру классификации по критерию минимального расстояния, с метрикой L1 и рангом 1.

Эта простая для реализации система показала самую высокую результативность РИЛ в масках по сравнению с другими Simple FaReS [22]. Результат контрольной проверки распознавания 14 × 100 изображений лиц в масках при 100 эталонах представлен на рис. 6. В соответствии с формулой (1), NUM состоит из 1400 изображений, $P \times P \geq 15 \times 15$, а число признаков для $P = 15$ составило 119.

[1] База изображений фронтальных лиц в масках [Электронный ресурс]. https://hci.nw.ru/ru/pages/masked-frontal-faces (дата обращения: 13.04.2022).



*Рис. 3*. Примеры типа масок, их формы, текстур и цвета, а также варианты изменения цветовой гаммы кожи лиц и фона изображения

*Fig. 3*. Examples of textures, colors, shapes, and types of masks as well as options for changing the color scheme of the skin of faces and the background of the image

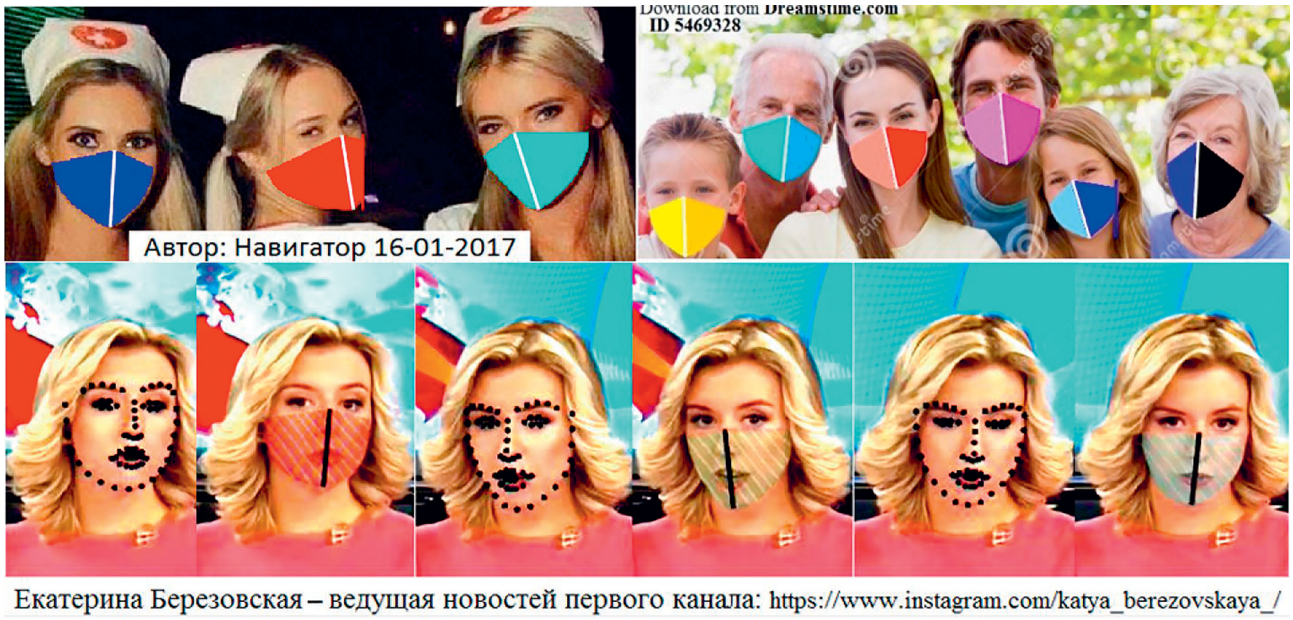



*Рис. 4*. Результат формирования масок при плоских и пространственных поворотах лиц, в том числе и на лицах из видеофайлов: линии ребра на масках отображают степень отклонения лиц от позиции анфас

*Fig. 4*. The result of the formation of masks for flat and spatial rotations of faces including faces from video files: edge lines on the masks show the degree of deviation of faces from the full-face position



*Рис. 5*. Изображения лиц при плоских и пространственных поворотах в масках из баз данных [7, 22]

*Fig. 5*. Masked faces images for flat and spatial rotations of faces from databases [7, 22]

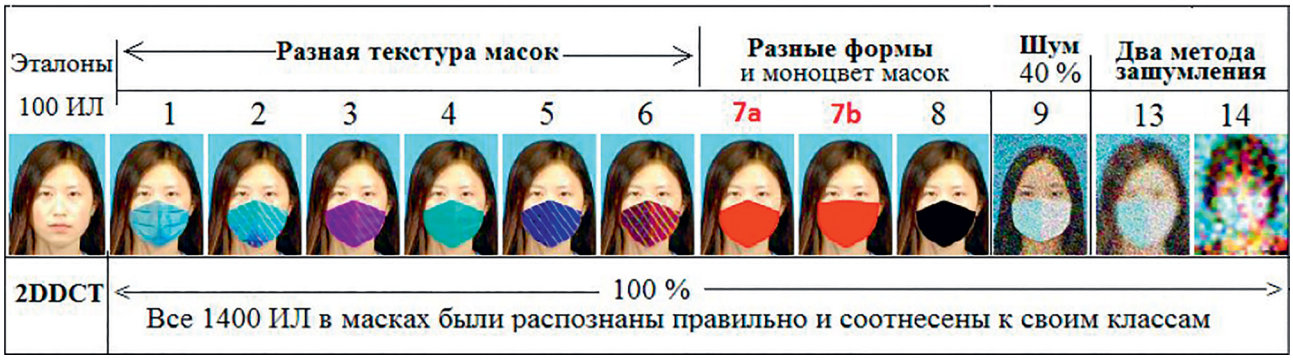



*Рис. 6*. Результат контрольной проверки распознавания 100×14 изображений лиц в масках

*Fig. 6*. The result of the reference check of the recognition of 1400 images of masked faces

### Нейросетевые системы, использованные в эксперименте

В нейросетевых системах РИЛ в масках использован детектор лиц RetinaFace. Эксперименты проведены с помощью трех экстракторов признаков ArgFace (на базе ResNet-34, представленном в библиотеке DeepFace), ResNet-50 и VGG-16 из библиотеки Keras-VGGFace). На вход экстракторы принимают изображения лиц, приведенные к квадратному разрежению. Для сохранения пропорций лица недостающие пикселы заполняются нулями. Кроме того, для каждого экстрактора признаков требуется своя предварительная обработка. Так, для ArgFace выполняется линейная нормализация пикселов изображений лиц и приведение его к разрешению 128 × 128. Для ResNet-50 и

VGG-16 проводится канальная нормализация пикселов (центрирование) изображений лиц и получение разрешения 224 × 224. В качестве классификатора использован критерий минимального расстояния с метрикой косинусного подобия.

### Экспериментальные результаты

В таблице приведены экспериментальные результаты, полученные с помощью предложенных систем РИЛ в масках, где названия нейросетевых систем соответствуют применяемым в них экстракторов признаков. В качестве показателя результативности РИЛ в масках выполнена оценка верно идентифицированных относительно общего числа использованных тестовых изображений лиц. Для эксперимента из более 20 000 сгенерированных изображений лиц в масках было отобрано 16 000.

Выбор данных масок обусловлен фактами, отмеченными исследователями при решении задач РИЛ для некоторых типов, форм и цвета масок [5], включая проблему зашумленности изображений лиц, удаленности лица от камеры, и использования популяций лиц в масках.

Сгенерированные изображения лиц можно разделить на группы следующим образом:

1) монохромные маски белого, красного, серого, черного, а также черно-синего цветов, медицинские и цветные текстурные;
2) лица в масках (п. 1) с наложением шума 40 % от максимальной яркости изображений [23];
3) лица в масках (п. 1) с имитацией удаленности от камеры [23];
4) лица в масках (п. 1) с комбинацией изменений по пп. 2 и 3;
5) различные преобразования изображений лиц в масках (де-идентификация, сжатие, сдвиг и растяжение с различной степенью [23]);
6) лица в масках различных цветов, текстур, в том числе с мордами животных;
7) лица в масках (п. 5) с перестановкой компонент (R, G, B) — всего 6 групп.

Результаты экспериментов показали, что детерминированная система Simple FaReS значительно превосходит по результатам нейросетевые системы. Незначительный спад точности наблюдается при комбинировании двух трансформаций (шум и имитация удаленности от камеры) изображений лиц в масках. Более существенный спад наблюдается при применении де-идентификации к изображениям лиц в масках: точность РИЛ составила 84 %, что на 10 % меньше, чем точность нейросетевой системы ArgFace. Эффективность детерминированной системы РИЛ в масках особенно явно видна на искаженных изображениях лиц (трансформации номер 8–10), что обусловлено использованием пространства признаков на основе косинус-преобразования, которое не так значительно (в отличие от яркостных признаков) реагирует на искажения и шумовые изменения текстуры изображений лиц. Кроме того, в пространстве признаков косинус-преобразования мера подобия изображений лиц между признаками оригинала и лица с маской, выше,

*Таблица.* Результаты распознавания изображений лиц, полученные в рамках использованных систем
*Table.* Results of the masked face recognition obtained using the proposed systems

| Номер | Тип маски/трансформации | Число изображений лиц | Точность, % | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Simple FaReS | ArgFace | ResNet-50 | VGG-16 |
| 1 | Белая маска | 100 | 100 | 90 | 95 | 89 |
| 2 | Красная маска | 100 | 100 | 93 | 89 | 86 |
| 3 | Серая маска | 100 | 100 | 90 | 90 | 90 |
| 4 | Черная маска | 100 | 100 | 94 | 95 | 78 |
| 5 | Черно-синяя маска | 100 | 100 | 89 | 95 | 82 |
| 6 | Текстурная маска | 100 | 100 | 91 | 95 | 98 |
| 7 | Медицинская маска | 100 | 100 | 89 | 98 | 95 |
| 8 | Шум (тип маски номер 1–7) | 700 | 100 | 4 | 6 | 9 |
| 9 | Имитация удаленности от камеры (тип маски номер 1–7) | 700 | 100 | 6 | 28 | 10 |
| 10 | Комбинация изменений по трансформациям номер 8 и 9 (тип маски номер 1–7) | 700 | 99 | 1 | 1 | 2 |
| 11 | Де-идентификация | 2000 | 84 | 94 | 85 | 85 |
| 12 | Различные текстурные маски | 1600 | 100 | 95 | 98 | 98 |
| 13 | Перестановки компонент | 9600 | 100 | 91 | 97 | 96 |
| 14 | Средняя точность по всем видам преобразований с изображениями лиц в масках (трансформации номер 8–11) | — | 96 | 26 | 30 | 27 |
| 15 | Средняя точность по всем группам (номера 1–13) | — | 99 | 71 | 75 | 71 |

чем в пространстве исходных данных (яркость пикселов). Данный результат положительно влияет на работу классификатора в детерминированной системе. Это подтверждает рис. 7, на котором представлены результаты оценки мер подобия «своего изображения лица» (рис. 7, *a*) и «чужого изображения лица» (рис. 7, *b*) с тремя видами изображений в белых масках с искаженной текстурой. Мера подобия вычислена как взаимная фазовая корреляция в пространстве исходных (яркостных) признаков (Cross Phase Correlation of Image, CPCI) и признаков косинус-преобразования (Cross Phase Correlation of Feature, CPCF), а также расстояния (Distance) в пространстве признаков косинус-преобразования. Аналогичные результаты с примерами и объяснениями такого эффекта получены в работе [24].

На основании анализа нейросетевых систем заметим, что лучшей системой по средней результативности РИЛ по всем группам тестовых данных является ResNet-50, остальные системы уступают ей лишь на 4 %. При этом, опираясь на результаты системы ResNet-50, видно, что ни одна из представленных типов масок не распознается на 100 %. Хуже всего распознаются маски красного и серого цветов (точность составила не более 90 %). Отметим, что нейросетевые системы совершенно не работоспособны в случаях, когда изображения лиц в масках имеют размытую или сглаженную текстуру лица, а также наложенный на них шум. РИЛ с искаженной текстурой лица в рамках сверточных нейросетей приводит к очень низкому результату из-за использования в них сверточных фильтров. Отклик сверточных фильтров в конечных результатах свертки приводит к совершенно другим минимаксным решениям и не только по значениям, но и по их положению – вплоть до хаотического их представления на выходе нейросети. Поскольку «хаос» несравним со значениями, полученными по эталонам, задача РИЛ с искаженной текстурой лица не может быть полностью решена в рамках сверточных нейросетей. Эта проблема нейросетевых систем может быть частично решена при применении предложенного метода генерации масок на изображении лиц людей. Использование данного метода позволит создать необходимые объемы обучающих данных на уже известных наборах данных (например, VGG-Face [25]) для дообучения современных экстракторов признаков на основе семейства ResNet и VGG-16.

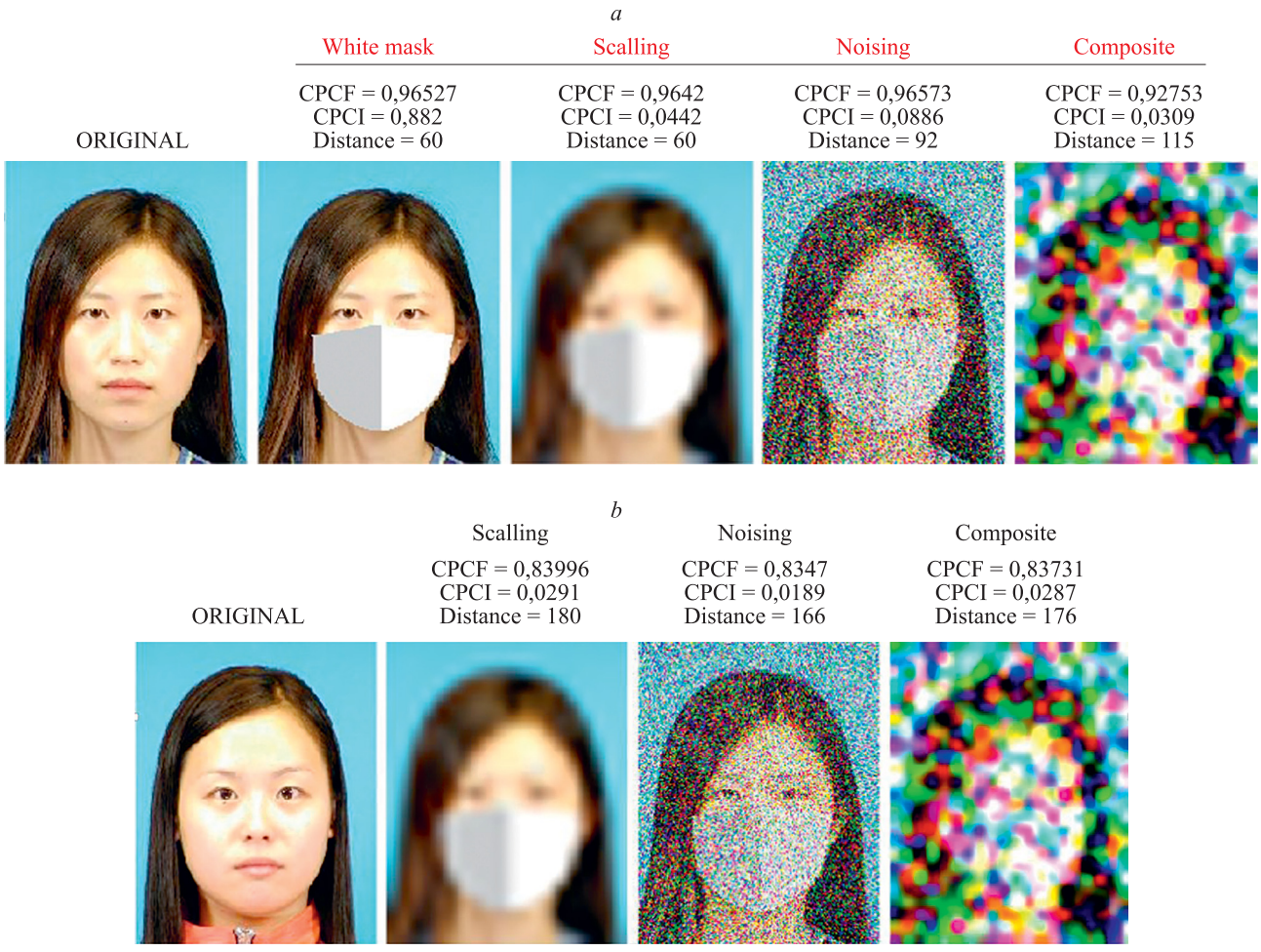



*Рис. 7*. Оценки подобия между своим (*a*) и чужим (*b*) изображениями лица и тремя видами изображений лиц в искаженных масках

*Fig. 7*. Estimates of similarity between one's own (*a*) and another's (*b*) face images and three types of images of faces in distorted masks

## Заключение

Исследована проблема распознавания изображений лиц в масках при условии, что эти маски наложены на оригинальные изображения лиц и, таким образом, становятся поддельными (SIMULATED MASKS) по отношению к реальным маскам (REAL MASKS) на лицах людей. Показано, что необходимость выполнения этого исследования связана, во-первых, с разнообразием типов, форм, текстуры и цвета реальных масок, используемых для гигиенической защиты лиц, и, во-вторых, с отсутствием соответствующих этим маскам реальных наборов обучающих данных. Отмечено, что оба эти факта создали проблемы для распознавания изображений лиц в подобных масках в рамках современных нейросетевых систем.

Как один из вариантов решения этой проблемы, предложен метод генерации масок на оригинальные изображения лиц людей. Метод включает генерацию и размещение на лицах различных типов масок (медицинских, цветных текстурных и прозрачных) — как на отдельных портретах, так и на групповых фото и лицах в сценах с потоками людей. Показано, что корректное размещение масок на изображении лица основано на ключевых точках лица, вычисляемых в онлайн-режиме, использовании мнемонических моделей масок и реализации процесса формирования масок непосредственно на текстуре изображений лиц. При этом предложенный метод не зависим от размеров изображений-оригиналов и их фенотипа, а также точного положения лиц АНФАС, что позволяет использовать предложенный метод со многими известными базами изображений лиц. Представлены варианты сгенерированных масок, которые практически не отличаются от реальных масок (REAL MASKS) и значительно превосходят поддельные маски (например, «печатные маски» или SIMULATED MASKS). В качестве исходных изображений-оригиналов использованы, как пример, 100 изображений лиц из базы CUFS. На их основе сгенерировано более 20 000 изображений лиц в масках. Выполнены эксперименты по распознаванию лиц из этой базы в рамках четырех систем: детерминированной системы с экстрактором признаков на базе косинус-преобразования и классификатором по минимуму расстояния с метрикой L1; трех нейросетевых систем, отличающиеся экстракторами признаков: ArgFace, ResNet-50 и VGG-16 — в качестве классификатора используется критерий минимального расстояния с метрикой косинусного подобия.

Предложенный метод генерации масок может быть использован для создания наборов данных и тестовых баз изображений лиц с масками. При этом используемые экстракторы признаков в нейросетевых системах распознавания изображений лиц могут быть дообучены на новых сгенерированных корпусах, что позволит частично решить существующие проблемы распознавания на основе нейросетей. Исследованные системы в дальнейшем могут быть использованы в локальных и потоковых системах контроля доступа. Работа будет полезна исследователям и специалистам в области обработки и анализа изображений лиц с масками.

## Литература


1. Ge S., Li J., Ye Q., Luo Z. Detecting masked faces in the wild with LLE-CNNs // Proc. of the 30th IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2017. P. 426–434. https://doi.org/10.1109/CVPR.2017.53
2. Ryumina E., Ryumin D., Ivanko D., Karpov A. A novel method for protective face mask detection using convolutional neural networks and image histograms // International Archives of the Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2021. V. XLIV-2/W1-2021. P. 177–182. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIV-2-W1-2021-177-2021
3. Косулин К.Э., Карпов А.А. Методы аудиовизуального распознавания людей в масках (обзорная статья) // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2022. Т. 22. № 3. (в печати).
4. Hsu G.-S.J., Wu H.-Y., Tsai C.-H., Yanushkevich S., Gavrilova M. Masked face recognition from synthesis to reality // IEEE Access. 2022. V. 10. P. 37938–37952. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3160828
5. Ngan M.L., Grother P. J., Hanaoka K.K. Ongoing Face Recognition Vendor Test (FRVT) Part 6A: Face recognition accuracy with masks using pre-COVID-19 algorithms: NISTIR 8311 / National Institute of Standards and Technology U.S. Department of Commerce. 2020. 58 p. https://doi.org/10.6028/NIST.IR.8311
6. Gorodnichy D., Yanushkevich S., Shmerko V. Automated border control: Problem formalization // Proc. of the IEEE Symposium on Computational Intelligence in Biometrics and Identity. 2014. P. 118–125. https://doi.org/10.1109/CIBIM.2014.7015452
7. Huang B., Wang Z., Wang G., Jiang K., He Z., Zou H., Zou Q. Masked face recognition datasets and validation // Proc. of the 18th IEEE/CVF International Conference on Computer Vision. 2021. P. 1487–1491. https://doi.org/10.1109/ICCVW54120.2021.00172
8. Deng J., Guo J., An X., Zhu Z., Zafeiriou S. Masked face recognition challenge: The insightface track report // Proc. of the 18th IEEE/CVF


## References


1. Ge S., Li J., Ye Q., Luo Z. Detecting masked faces in the wild with LLE-CNNs. *Proc. of the 30th IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2017, pp. 426–434. https://doi.org/10.1109/CVPR.2017.53
2. Ryumina E., Ryumin D., Ivanko D., Karpov A. A novel method for protective face mask detection using convolutional neural networks and image histograms. *International Archives of the Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2021, vol. XLIV-2/W1-2021, pp. 177–182. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIV-2-W1-2021-177-2021
3. Kosulina K.E., Karpov A.A., Methods for audiovisual recognition of people in masks. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2022, vol. 22, no. 3, in press. (in Russian)
4. Hsu G.-S.J., Wu H.-Y., Tsai C.-H., Yanushkevich S., Gavrilova M. Masked face recognition from synthesis to reality. *IEEE Access*, 2022, vol. 10, pp. 37938–37952. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3160828
5. Ngan M.L., Grother P. J., Hanaoka K. K. *Ongoing Face Recognition Vendor Test (FRVT) Part 6A: Face recognition accuracy with masks using pre-COVID-19 algorithms. NISTIR 8311*. National Institute of Standards and Technology U.S. Department of Commerce, 2020, 58 p. https://doi.org/10.6028/NIST.IR.8311
6. Gorodnichy D., Yanushkevich S., Shmerko V. Automated border control: Problem formalization. *Proc. of the IEEE Symposium on Computational Intelligence in Biometrics and Identity*, 2014, pp. 118–125. https://doi.org/10.1109/CIBIM.2014.7015452
7. Huang B., Wang Z., Wang G., Jiang K., He Z., Zou H., Zou Q. Masked face recognition datasets and validation. *Proc. of the 18th IEEE/CVF International Conference on Computer Vision*, 2021, pp. 1487–1491. https://doi.org/10.1109/ICCVW54120.2021.00172
8. Deng J., Guo J., An X., Zhu Z., Zafeiriou S. Masked face recognition challenge: The insightface track report. *Proc. of the 18th IEEE/CVF*

International Conference on Computer Vision. 2021. P. 1437–1444. https://doi.org/10.1109/ICCVW54120.2021.00165
9. Zhu Z., Huang G., Deng J., Ye Y., Huang J., Chen X., Zhu J., Yang T., Guo J., Lu J., Du D., Zhou J. Masked face recognition challenge: The webface260m track report // arXiv. 2021. arXiv.2108.07189. https://doi.org/10.48550/arXiv.2108.07189
10. Adjabi I., Ouahabi A., Benzaoui A., Taleb-Ahmed A. Past, present, and future of face recognition: A review // Electronics. 2020. V. 9. N 8. P. 1188. https://doi.org/10.3390/electronics9081188
11. Alzu'bi A., Albalas F., Al-Hadhrami T., Younis L.B., Bashayreh A. Masked face recognition using deep learning: A review // Electronics. 2021. V. 10. N 21. P. 2666. https://doi.org/10.3390/electronics10212666
12. Deng J., Guo J., Ververas E., Kotsia I., Zafeiriou S. RetinaFace: Single-shot multi-level face localisation in the wild // Proc. of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2020. P. 5202–5211. https://doi.org/10.1109/CVPR42600.2020.00525
13. He K., Zhang X., Ren S., Sun J. Deep residual learning for image recognition // Proc. of the 29th IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2016. P. 770–778. https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.90
14. Simonyan K., Zisserman A. Very deep convolutional networks for large-scale image recognition // Proc. of the 3rd International Conference on Learning Representations (ICLR). 2015. P. 1–14.
15. Serengil S.I., Ozpinar A. LightFace: A hybrid deep face recognition framework // Proc. of the IEEE Innovations in Intelligent Systems and Applications Conference (ASYU). 2020. P. 9259802. https://doi.org/10.1109/ASYU50717.2020.9259802
16. Viola P., Jones M.J. Robust real-time face detection // International Journal of Computer Vision. 2004. V. 57. N 2. P. 137–154. https://doi.org/10.1023/B:VISI.0000013087.49260.fb
17. Kazemi V., Sullivan J. One millisecond face alignment with an ensemble of regression trees // Proc. of the 27th IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2014. P. 1867–1874. https://doi.org/10.1109/CVPR.2014.241
18. Shimrat M. Algorithm 112: position of point relative to polygon // Communications of the ACM. 1962. V. 5. N 8. P. 434. https://doi.org/10.1145/368637.368653
19. Агеев М.И., Алик В.П., Марков Ю.И. Библиотека алгоритмов 101б-150б. М.: Радио и связь, 1978. 128 с. (Библиотека технической кибернетики).
20. Гричишин Я.Т., Ефимов В.И., Ломакович А.Н. Алгоритмы и программы на Бейсике: учебное пособие для студентов педагогических институтов по физико-математическим специальностям. М.: Просвещение, 1988. 160 с.
21. Щеголева Н.Л., Кухарев Г.А. Простой алгоритм классификации линейно неразделимых данных // Естественные и технические науки. 2012. № 1(57). С. 358–364.
22. Loey M., Manogaran G., Taha M.H.N., Khalifa N.E.M. A hybrid deep transfer learning model with machine learning methods for face mask detection in the era of the COVID-19 pandemic // Measurement. 2021. V. 167. P. 108288. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108288
23. Кухарев Г.А., Каменская Е.И., Матвеев Ю.Н., Щеголева Н.Л. Методы обработки и распознавания изображений лиц в задачах биометрии / под ред. М.В. Хитрова. СПб.: Политехника, 2013. 388 с.
24. Cao Q., Shen L., Xie W., Parkhi O.M., Zisserman A. VGGFace2: A dataset for recognising faces across pose and age // Proc. of the 13th IEEE International Conference on Automatic Face & Gesture Recognition (FG). 2018. P. 67–74. https://doi.org/10.1109/FG.2018.00020
25. Кухарев Г.А., Мауленов К.С., Щеголева Н.Л. Защита изображений лиц от распознавания в социальных сетях: способы решения и их перспективы // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2021. Т. 21. № 5. С. 755–766. https://doi.org/10.17586/2226-1494-2021-21-5-755-766

*International Conference on Computer Vision*, 2021, pp. 1437–1444. https://doi.org/10.1109/ICCVW54120.2021.00165
9. Zhu Z., Huang G., Deng J., Ye Y., Huang J., Chen X., Zhu J., Yang T., Guo J., Lu J., Du D., Zhou J. Masked face recognition challenge: The webface260m track report. *arXiv*, 2021, arXiv.2108.07189. https://doi.org/10.48550/arXiv.2108.07189
10. Adjabi I., Ouahabi A., Benzaoui A., Taleb-Ahmed A. Past, present, and future of face recognition: A review. *Electronics*, 2020, vol. 9, no. 8, pp. 1188. https://doi.org/10.3390/electronics9081188
11. Alzu'bi A., Albalas F., Al-Hadhrami T., Younis L.B., Bashayreh A. Masked face recognition using deep learning: A review. *Electronics*, 2021, vol. 10, no. 21, pp. 2666. https://doi.org/10.3390/electronics10212666
12. Deng J., Guo J., Ververas E., Kotsia I., Zafeiriou S. RetinaFace: Single-shot multi-level face localisation in the wild. *Proc. of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2020, pp. 5202–5211. https://doi.org/10.1109/CVPR42600.2020.00525
13. He K., Zhang X., Ren S., Sun J. Deep residual learning for image recognition. *Proc. of the 29th IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2016, pp. 770–778. https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.90
14. Simonyan K., Zisserman A. Very deep convolutional networks for large-scale image recognition. *Proc. of the 3rd International Conference on Learning Representations (ICLR)*, 2015, pp. 1–14.
15. Serengil S. I., Ozpinar A. LightFace: A hybrid deep face recognition framework. *Proc. of the IEEE Innovations in Intelligent Systems and Applications Conference (ASYU)*, 2020, pp. 9259802. https://doi.org/10.1109/ASYU50717.2020.9259802
16. Viola P., Jones M.J. Robust real-time face detection. *International Journal of Computer Vision*, 2004, vol. 57, no. 2, pp. 137–154. https://doi.org/10.1023/B:VISI.0000013087.49260.fb
17. Kazemi V., Sullivan J. One millisecond face alignment with an ensemble of regression trees. *Proc. of the 27th IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2014, pp. 1867–1874. https://doi.org/10.1109/CVPR.2014.241
18. Shimrat M. Algorithm 112: position of point relative to polygon. *Communications of the ACM*, 1962, vol. 5, no. 8, pp. 434. https://doi.org/10.1145/368637.368653
19. Ageev M.I., Alik V.P., Markov Iu.I. *Algorithms 101б-150б Library*. Handbook. Moscow, Radio i svjaz' Publ., 1978, 128 p. (in Russian)
20. Grichishin Ia.T., Efimov V.I., Lomakovich A.N. *Algorithms and Programs in BASIC*. Moscow, Prosveshhenie Publ., 1988, 160 p. (in Russian)
21. Shchegoleva N.L., Kukharev G.A. A simple classification algorithm for linearly inseparable data. *Natural and Technical Sciences*, 2012, no. 1(57), pp. 358–364. (in Russian)
22. Loey M., Manogaran G., Taha M.H.N., Khalifa N.E.M. A hybrid deep transfer learning model with machine learning methods for face mask detection in the era of the COVID-19 pandemic. *Measurement*, 2021, vol. 167, pp. 108288. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108288
23. Kukharev G.A., Kamenskaya A.I., Matveev Y.N. *Methods of facial images processing and recognition in biometrics*. St.Petersburg, Politechnika Publ., 2013, 388 p. (in Russian)
24. Cao Q., Shen L., Xie W., Parkhi O.M., Zisserman A. VGGFace2: A dataset for recognising faces across pose and age. *Proc. of the 13th IEEE International Conference on Automatic Face & Gesture Recognition (FG)*, 2018, pp. 67–74. https://doi.org/10.1109/FG.2018.00020
25. Kukharev G.A., Maulenov K.S., Shchegoleva N.L. Protecting facial images from recognition on social media: solution methods and their perspective. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2021, vol. 21, no. 5, pp. 755–766. (in Russian). https://doi.org/10.17586/2226-1494-2021-21-5-755-766

**Авторы**

**Кухарев Георгий Александрович** — доктор технических наук, профессор, профессор, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова, Санкт-Петербург, 197376, Российская Федерация, SC 18037842200, https://orcid.org/0000-0003-2188-2172, gakukharev@etu.ru

**Рюмина Елена Витальевна** — младший научный сотрудник, Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук, Санкт-Петербург, 199178, Российская Федерация, SC 57220572427, https://orcid.org/0000-0002-4135-6949, ryumina_ev@mail.ru

**Шульгин Никита Александрович** — студент, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова, Санкт-Петербург, 197376, Российская Федерация, https://orcid.org/0000-0002-1884-5832, nikitashulgin@gmail.com

**Authors**

**Georgy A. Kukharev** — D. Sc., Full Professor, Saint Petersburg State Electrotechnical University "LETI", Saint Petersburg, 197376, Russian Federation, SC 18037842200, https://orcid.org/0000-0003-2188-2172, gakukharev@etu.ru

**Elena V. Ryumina** — Junior Researcher, Saint Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS), Saint Petersburg, 199178, Russian Federation, SC 57220572427, https://orcid.org/0000-0002-4135-6949, ryumina_ev@mail.ru

**Nikita A. Shulgin** — Student, Saint Petersburg State Electrotechnical University "LETI", Saint Petersburg, 197376, Russian Federation, https://orcid.org/0000-0002-1884-5832, nikitashulgin@gmail.com

*Статья поступила в редакцию 14.04.2022*
*Одобрена после рецензирования 26.04.2022*
*Принята к печати 30.05.2022*

*Received 14.04.2022*
*Approved after reviewing 26.04.2022*
*Accepted 30.05.2022*

Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ
май–июнь 2022 Том 22 № 3 http://ntv.ifmo.ru/
SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL OF INFORMATION TECHNOLOGIES, MECHANICS AND OPTICS
May–June 2022 Vol. 22 No 3 http://ntv.ifmo.ru/en/
ISSN 2226-1494 (print) ISSN 2500-0373 (online)
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК УНИВЕРСИТЕТ ИТМО ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ

doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-3-559-566

# Improving sign language processing via few-shot machine learning

**Grigory F. Shovkoplias[1], Dmitriy A. Strokov[2], Daniil V. Kasantsev[3], Aleksandra S. Vatian[4], Arip A. Asadulaev[5], Ivan V. Tomilov[6], Anatoly A. Shalyto[7], Natalia F. Gusarova[8]✉**

[1,2,3,4,5,6,7,8] ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

[1] gfshovkoplias@itmo.ru, https://orcid.org/0000-0001-7777-6972
[2] dmitry.strokov@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-1924-0621
[3] kazantsev@itkvar.ru, https://orcid.org/0000-0001-7974-0922
[4] alexvatyan@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-5483-716X
[5] aripasadulaev@itmo.ru, https://orcid.org/0000-0002-2581-935X
[6] ivan-tomilov3@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0003-1886-2867
[7] anatoly.shalyto@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-2723-2077
[8] natfed@list.ru✉, https://orcid.org/0000-0002-1361-6037

**Abstract**

Improving the efficiency of communication of deaf and hard of hearing people by processing sign language using artificial intelligence is an important task both socially and technologically. One of the ways to solve this problem is a fairly cheap and accessible marker method. The method is based on the registration of electromyographic (EMG) muscle signals using bracelets worn on the arm. To improve the quality of recognition of gestures recorded by the marker method, a modification of the marker method is proposed — duplication of EMG sensors in combination with a low-frame machine learning approach. We experimentally study the possibilities of improving the quality of processing of sign language by duplicating EMG sensors as well as by reducing the volume of the dataset required for training machine learning tools. In the latter case, we compare several technologies of the few-shot approach. Our experiments show that training with few-shot neural nets on 56k samples we can achieve better results than training on random forest with 160k samples. The use of a minimum number of sensors in combination with few-shot signal processing techniques provides the possibility of organizing quick and cost-effective interaction with people with hearing and speech disabilities.

**Keywords**

sign language processing, few-shot machine learning, bracelets, marker methods

**Aknowledgements**

This research was supported by Priority 2030 Federal Academic Leadership Program.

**For citation:** Shovkoplias G.F., Strokov D.A., Kasantsev D.V., Vatian A.S., Asadulaev A.A., Tomilov I.V., Shalyto A.A., Gusarova N.F. Improving sign language processing via few-shot machine learning. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2022, vol. 22, no. 3, pp. 559–566. doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-3-559-566

УДК 004.85

# Повышение эффективности обработки жестового языка посредством малокадрового машинного обучения

**Григорий Филиппович Шовкопляс[1], Дмитрий Андреевич Строков[2], Даниил Владимирович Казанцев[3], Александра Сергеевна Ватьян[4], Арип Амирханович Асадулаев[5], Иван Вячеславович Томилов[6], Анатолий Абрамович Шалыто[7], Наталия Федоровна Гусарова[8]✉**

[1,2,3,4,5,6,7,8] Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

[1] gfshovkoplias@itmo.ru, https://orcid.org/0000-0001-7777-6972
[2] dmitry.strokov@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-1924-0621

© Shovkoplias G.F., Strokov D.A., Kasantsev D.V., Vatian A.S., Asadulaev A.A., Tomilov I.V., Shalyto A.A., Gusarova N.F., 2022

[3] kazantsev@itkvar.ru, https://orcid.org/0000-0001-7974-0922
[4] alexvatyan@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-5483-716X
[5] aripasadulaev@itmo.ru, https://orcid.org/0000-0002-2581-935X
[6] ivan-tomilov3@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0003-1886-2867
[7] anatoly.shalyto@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-2723-2077
[8] natfed@list.ru✉, https://orcid.org/0000-0002-1361-6037

**Аннотация**

**Предмет исследования.** Повышение эффективности коммуникации глухих и слабослышащих людей путем обработки жестового языка средствами искусственного интеллекта – важная задача в социальном и в технологическом планах. Одним из направлений решения этой проблемы является применение достаточно дешевого и доступного маркерного метода. **Метод.** Метод основан на регистрации электромиографических сигналов мышц, регистрируемых с помощью браслета, надеваемого на руку. Для повышения качества распознавания жестов применяется модификация маркерного метода, сущность которого состоит в дублировании датчиков электромиографических сигналов в сочетании с малокадровым подходом машинного обучения. **Основные результаты.** Экспериментально изучены возможности повышения качества обработки жестового языка за счет дублирования электромиографических датчиков и уменьшения набора данных, необходимого для машинного обучения. Выполнено сравнение нескольких технологий малокадрового подхода. Показано, что при обучении малокадровых нейронных сетей на наборе данных объемом 56 000 образцов можно достичь лучших результатов, чем при обучении классификатора типа «случайный лес» на наборе данных объемом 160 000 образцов. **Практическая значимость.** Использование минимального количества датчиков электромиографических сигналов в сочетании с малокадровыми методами их обработки обеспечивает возможность организации быстрого и экономичного взаимодействия с людьми с нарушениями слуха и речи.

**Ключевые слова**

обработка жестового языка, малокадровое машинное обучение, браслеты, маркерные методы

**Благодарности**

Работа поддержана Федеральной программой «Приоритет 2030».

**Ссылка для цитирования:** Шовкопляс Г.Ф., Строков Д.А., Казанцев Д.В., Ватьян А.С., Асадулаев А.А., Томилов И.В., Шалыто А.А., Гусарова Н.Ф. Повышение эффективности обработки жестового языка посредством малокадрового машинного обучения // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2022. Т. 22, № 3. С. 559–566 (на англ. яз.). doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-3-559-566

## Introduction

According to the World Health Organization, practically or completely deaf and dumb people make up more than 5 % of the world's population. Improving communication efficiency with people with hearing and speech disabilities is one of the most important goals of real-world applications of Intelligent Techniques (IT) and Artificial intelligence (AI). This problem becomes especially important in the context of medical care for patients with hearing and speech disabilities, when medical personnel needs to obtain the most prompt and accurate information about the status of a potentially infected or already ill person.

The main means of communication for the deaf and hearing-impaired people is Sign Language (SL), which, apparently, most medical personnel do not know. Therefore, there is a great need for the development and widespread introduction into medical practice of IT tools for SL processing, that is, computer SL interpretation systems that convert a sequence of gestures (sign speech) into text in a spoken language.

There are two ways to recognize gestures using technical means: markerless and marker [1–3]. Markerless methods use video cameras and infrared transmitters that allow tracking movements, with subsequent processing of the video stream. Marker methods use sensors recording the electromyographic (EMG) signals of muscles which correspond to the performance of certain gestures. These are either special gloves or devices on the wrists, such as bracelets. The marker method is fundamentally simpler than markerless one, and for reasons of user friendliness and affordability, they have taken a leading position in the market in recent years [4–6]. A typical scenario for using the marker method for medical needs is as follows. The patient (a native speaker of SL) puts a specialized bracelet [7] on his forearm and spells the words in his usual way; each gesture is classified by means of AI. The resulting sequential set of tokens is converted into text using NLP and then displayed on the screen of the doctor's mobile phone or converted into audio speech.

However, in real practice, the execution of this scenario encounters a number of difficulties. First, the EMG signal corresponding to the same gesture depends significantly on the individual characteristics of the person's forearm, such as the presence of fatty tissue, sweat and hair, as well as on the position of the sensor on it [8]. Second, SL is context sensitive, i.e., the result of token recognition and their interpretation will depend on the nationality of the speaker, on the communication situation, etc. As a result, when processing SL by means of AI, there are uncertainties arising both at the stage of signal pickup and at the stage of converting a sequence of tokens into a coherent text. It significantly reduces the efficiency of SL processing or even makes it impossible, which is especially important for organizing full-fledged communication in the provision of emergency medical care.

Our contribution to the solution of this problem is twofold. We experimentally study the possibilities of improving the quality of processing of SL by duplicating EMG sensors, as well as by reducing the volume of the dataset required for training AI tools. In the latter case, we compare several technologies of the few-shot approach [9].

## Background and Related Works

The problem of increasing robustness in the marker-based SL processing is constantly in the field of view of researchers. In recent years, various approaches have been proposed for this purpose, including ensemble neural network learning [10], multiple-agent voting [11], bilinear models [12], spectral decomposition and common modes analysis [13], back propagation neural networks [14], building of fuzzy matrix model [15], and support vector machines [8]. In general, the listed approaches rely heavily on the availability of a large amount of training data.

A number of studies focus on working with small input data. In these cases, it is suggested to use information fusion based on convolutional neural networks [16], transfer learning [17], and data augmentation schemes [18]. But, as mentioned in the review [19], the robustness of marker-based SL processing remains underexplored. In this regard, the few-shot learning approach as a variant of domain adaptation with the goal of inferring the required output based on just one or a few training examples should be highlighted. For example, the work [20] shows that the few-shot learning approach quickly generalizes after seeing very few examples from each class. Namely, for 5 classes sampled from whole set of labels and 5 examples extracted sampled from each of those 5 classes, the classification accuracy of 73–86 % was obtained depending on a specific problem statement.

There are two main approaches to fulfill few-shot learning — optimization-based and metric-based. The first approach [21, 22] uses gradient descent-based methods as the optimization process in the meta-learning, sharing knowledge across all tasks. Metric-based methods [23, 24] classify samples based on the distance between them; they require less computing resources compared to optimization-based. In general, though the few-shot methods are claimed for the classification of datasets containing a small number of examples in each class, their high accuracy is achieved only on large datasets such as American SL [25], and it drops sharply with a decrease in the size of the dataset (74.7 % for Flemish SL corpus [26] and even less, up to 48.6 % [27]).

The influence of the sensors position and configuration on the EMG signal is stated in a number of works [8, 28–30]. For example, placing sensors on the flexor carpi radialis, flexor carpi ulnaris, extensor digitorum communis and extensor carpi ulnaris significantly (several times) changes the amplitude of the EMG signal as well as its shape for the same gesture [30]. According to [28], the sensor position on the flexor carpi ulnaris muscle has a critical contribution to the authentication performance of the EMG signal. Obviously, in the conditions of real medical practice, it is not possible to position the sensors on the patient's arm, taking into account the location of specific muscles. In this regard, it is proposed to use a set of sensors covering the entire arm of the patient to a certain extent and to process the averaged signal. The work [31] even proposes a distributed signal pickup using a sensitive sleeve. Much more technological and economical is the simultaneous use of several widespread sensors such as [7]. However, the study of the influence of the number of sensors on the efficiency of processing SL by the marker method has not been presented in the literature.

Thus, the task of the article is to compare the effectiveness of SL processing methods depending on the amount of data available (few-shot method vs. traditional random forest method) and on the number of simultaneously used EMG sensors.

## Materials and Methods

Traditional few-shot learning techniques fulfill classification within a subset of classes named episode (usually of 2–10 classes in each episode). In the case of SL processing, one needs on-line classification within the entire alphabet of gestures. To eliminate this contradiction, we have proposed a modification of the few-shot method presented in Fig. 1.

To make few-shot learning model applicable to the given task, we propose a range of modifications, our contribution is three fold.

1) Standard approach to teaching where we have access to training examples and information about to which class each sample belongs to. We propose a new distance based training pipeline by few-shot architecture with an output dimension equal to the number of classes. During each training step our method learns to output probability for each class in dataset.
2) (top image) Traditional few-shot learning used when there are a large number of classes and a small number of examples within each class. The dataset is divided into episodes, consisting of examples (train) shots and queries (test) shots. Based on examples, the model "remembers" how each class looks like and, when receiving some queries (test) shots, it is able to carry out a classification. The task of the few shot learning model in this setting is to learn to distinguish different classes by building separable representation of each class in episode and compare test examples with built representation. Formally, we have function, $f_\varphi$, with learnable parameters $\varphi$ and some squared Euclidean distance $d$ between outputs of this function:

$$f_\varphi: \mathbb{R}^D \rightarrow \mathbb{R}^M.$$

$\mathbb{R}^D$ is the $D$-dimensional feature vector, $\mathbb{R}^M$ is $M$-dimensional representation vector. Our neural networks produce a distribution over classes, $p_\varphi$, for an inputs sample $x$ based on a Softmax function over distances between representations, built for each class:

$$p_\varphi(y = k|\mathbf{x}) = \frac{\exp(-d(f_\varphi(\mathbf{x}), \mathbf{c}_k))}{\sum_{k'} \exp(-d(f_\varphi(\mathbf{x}), \mathbf{c}_{k'}))}$$

$\mathbf{c}_k$ corresponds to a prototype of a class $k$, similarly.

In our experiment, we have selected computationally inexpensive metric-based models, presented in the Background and Related Works section, being the most common in the field, namely, Matching Networks [32] and Prototypical Networks [24]. We used a typical implementation of the random forest classifier from the scikit-learn1 package, all parameters are set by default.

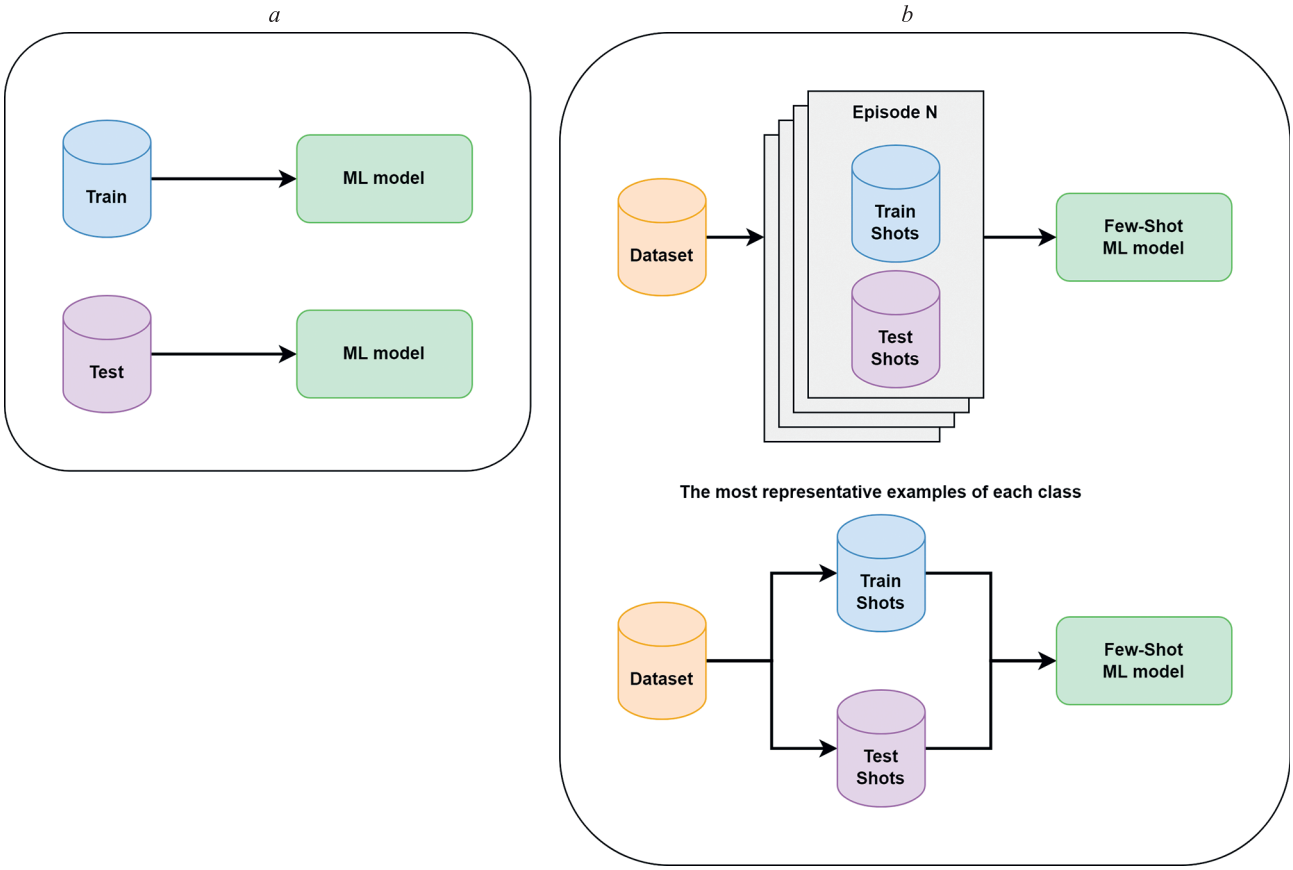



*Fig. 1*. Different approaches to model training

For investigations, we used a putEMG dataset [33] containing the EMG signal records of the corresponding hand gesture. The dataset includes records of 8 basic gestures performed by 44 volunteers. The total size of the dataset was 160,000 rows with a fairly even distribution across classes (Fig. 2).

To take the data, 3 Myo Thalmic bracelets [7] were used which were sequentially attached to the arm: the first one was approximately 1/4 of the forearm length from the elbow, each with a shift of approximately 1/5 of the forearm length. For our experiments, we used data from 30 volunteers and formed the following sub-datasets from them: 3 datasets containing data from each bracelet (1, 2, and 3); 3 datasets containing data for pairs of bracelets (1 and 2, 2 and 3, 1 and 3); 1 dataset containing data for all three bracelets. Each of the constructed sub-datasets was grouped into 7 classes into new datasets, from which 400 rows were taken. As a result, each of the 7 classes contains 30 instances of 400 rows each, of which data for 20 volunteers were used to create a sup-porting set, and the remaining 10 were used to create queries.

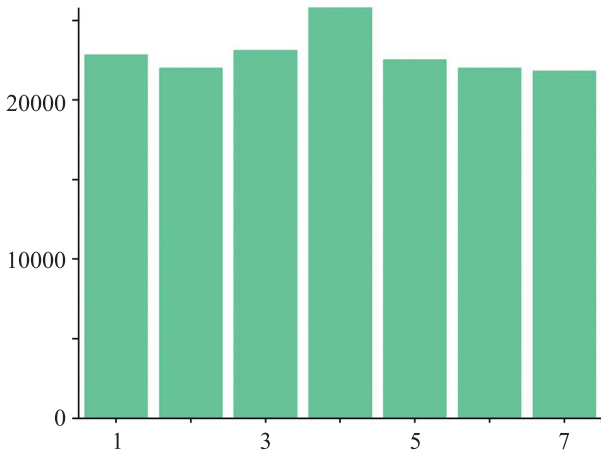



*Fig. 2*. Distribution of dataset elements by classes

## Results

The results of the experiment are presented in the Fig. 3. The Fig. 3, *a*, *b* use notation typical for few-shot methods, namely: ‘k-way’ is the number of classes; ‘n-shot’ is the number of samples elicited from each class; and Q is the number of examples per class. In all figures, as an *y* axis value, we use a measure of the effectiveness of the classification of gestures CA (categorical efficiency), i.e., the frequency of the correct class definition, indicated, respectively, for each bracelet or their combination (e.g., CA1 stands for categorical efficiency acquired using only the first bracelet, CA12 stands for categorical efficiency acquired using the first and the second one, and so forth). Fig. 3, *c* shows the value of accuracy (*y* axis) obtained by a Random Forest classifier at the optimal number of splits.

## Discussion

To compare achieved results, it is better to use Fig. 3, since they offer a visual approach. First of all, we should

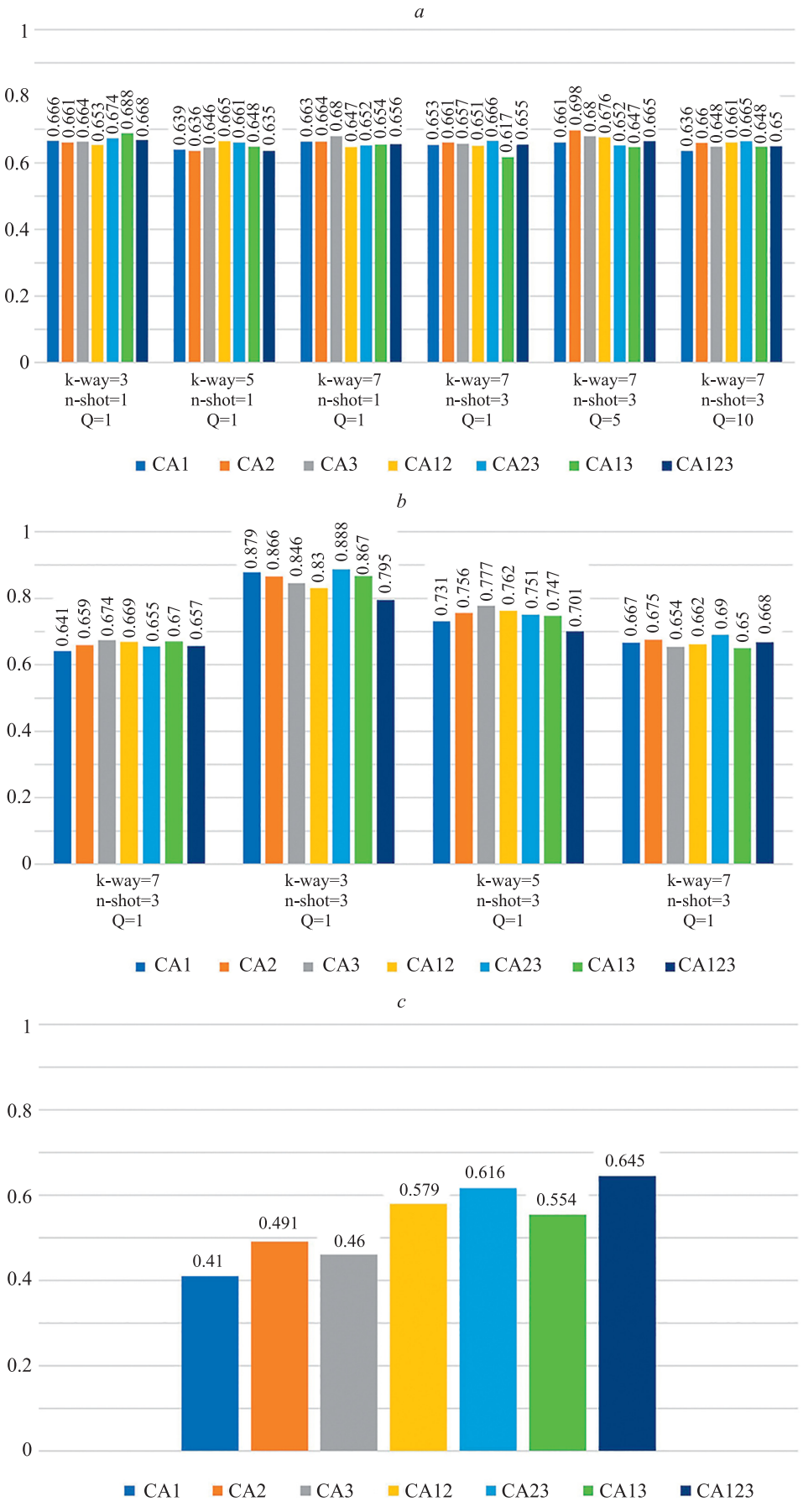



*Fig. 3*. ProtoNets results (*a*); Matching Networks results (*b*); Random Forest results (*c*).
k-way is the number of classes; n-shot is the number of samples elicited from each class; Q is the number of examples per class

notice that using the few-shots methods resulted in a better ability to distinguish samples in comparison to the random forest algorithm, see Fig. 3, *c*. Secondly, we found out that the difference between various combinations of bracelets does not have the significant impact on the result of a classification. We were not able to establish any kind of correlation between used bracelet (or their combinations) and the calculated metric. Considering those two facts, we concluded that it is more suitable to use the few-shot approach and that there is no major impact on a result depending on used bracelets.

## Conclusion

In our paper, we explored various scenarios for model training. We tested the range of few-shot models, with different settings for few datasets and their combinations. We carried out the grid search over the hyper-parameters of a few-shot model for dataset; we adjusted the different values of LR and the optimizer: n-shot, k-way, q-queries. Results are presented in Fig. 3, *a*, *b*. Our results show that training with few-shot neural nets on 56k samples we can achieve better results than training on random forest with 160k samples, see Fig. 3, *c*.

Our results show that increasing the number of features via combining different datasets does not significantly increase the accuracy of the model. In our opinion, this behavior is primarily associated with an increase in the dataset noise after the dataset combination. The noisiness of the data is often the cause of difficulties in predictions using neural networks. The lack of strong patterns in the data obtained from the different band also affects the accuracy of neural networks.

Finally, combining datasets increase the dimension of the input data. For a single dataset, the sample size is (8, 20, 20), which equals to 3200 features characterizing a certain action. In the case of combining datasets the sample size is (24, 20, and 20), the number of features is 9600, this makes model training more complicated and requires using complex deep learning techniques. Using deep models has its draw-backs in speed of inference, slowing down the inference can affect the quality of the tool application in real-time cases.

Thus, the use of a minimum number of sensors in combination with few-shot signal processing techniques provides the possibility of organizing quick and cost-effective interaction with people with hearing and speech disabilities.

## References


1. Agrawal S.C., Jalal A.S., Tripathi R.K. A survey on manual and non-manual sign language recognition for isolated and continuous sign. *International Journal of Applied Pattern Recognition*, 2016, vol. 3, no. 2, pp. 99–134. https://doi.org/10.1504/ijapr.2016.079048
2. Bragg D., Koller O., Bellard M., Berke L., Boudrealt P., Braffort A., Caselli N., Huenerfauth M., Kacorri H., Verhoef T., Vogler C., Morris M.R. Sign language recognition, generation, and translation: An interdisciplinary perspective. *Proc. of the 21st International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility (ASSETS)*, 2019, pp. 16–31. https://doi.org/10.1145/3308561.3353774
3. Kamal S.M., Chen Y., Li S., Shi X., Zheng J. Technical approaches to Chinese sign language processing: A review. *IEEE Access*, 2019, vol. 7, pp. 96926–96935. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2929174
4. O'Connor T.F., Fach M.E., Miller R., Root S.E., Mercier P.P., Lipomi D.J. The Language of Glove: Wireless gesture decoder with low-power and stretchable hybrid electronics. *PLoS ONE*, 2017, vol. 12, no. 7, pp. e0179766. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0179766
5. Song Y., Lee S., Choi Y., Han S., Won H., Sung T.-H., Choi Y., Bae J. Design framework for a seamless smart glove using a digital knitting system. *Fashion and Textiles*, 2021, vol. 8, no. 1, pp. 6. https://doi.org/10.1186/s40691-020-00237-2
6. Zhou Z., Chen K., Li X., Zhang S., Wu Y., Zhou Y., Meng K., Sun C., He Q., Fan W., Fan E., Lin Z., Tan X., Deng W., Yang J., Chen J. Sign-to-speech translation using machine-learning-assisted stretchable sensor arrays. *Nature Electronics*, 2020, vol. 3, no. 9, pp. 571–578. https://doi.org/10.1038/s41928-020-0428-6
7. Bernhardt P. *Myo SDK Beta 7*. Available at: https://developerblog.myo.com/myo-sdk-beta-7/ (accessed:10.02.2022).
8. Abreu J.G., Teixeira J.M., Figueiredo L.S., Teichrieb V. Evaluating sign language recognition using the Myo armband. *Proc. of the 18th Symposium on Virtual and Augmented Reality (SVR)*, 2016, pp. 64–70. https://doi.org/10.1109/SVR.2016.21
9. Wang Y., Yao Q., Kwok J., Ni L.M. Generalizing from a few examples: A survey on few-shot learning. *ACM Computing Surveys*, 2020, vol. 53, no. 3, pp. 63. https://dl.acm.org/doi/10.1145/3386252
10. Wang F., Zhao S., Zhou X., Li C., Li M., Zeng Z. An recognition–verification mechanism for real-time Chinese sign language recognition based on multi-information fusion. *Sensors (Basel)*, 2019, vol. 19, no. 11, pp. 2495. https://doi.org/10.3390/s19112495


## Литература


1. Agrawal S.C., Jalal A.S., Tripathi R.K. A survey on manual and non-manual sign language recognition for isolated and continuous sign // International Journal of Applied Pattern Recognition. 2016. V. 3. N 2. P. 99–134. https://doi.org/10.1504/ijapr.2016.079048
2. Bragg D., Koller O., Bellard M., Berke L., Boudrealt P., Braffort A., Caselli N., Huenerfauth M., Kacorri H., Verhoef T., Vogler C., Morris M.R. Sign language recognition, generation, and translation: An interdisciplinary perspective // Proc. of the 21st International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility (ASSETS). 2019. P. 16–31. https://doi.org/10.1145/3308561.3353774
3. Kamal S.M., Chen Y., Li S., Shi X., Zheng J. Technical approaches to Chinese sign language processing: A review // IEEE Access. 2019. V. 7. P. 96926–96935. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2929174
4. O'Connor T.F., Fach M.E., Miller R., Root S.E., Mercier P.P., Lipomi D.J. The Language of Glove: Wireless gesture decoder with low-power and stretchable hybrid electronics // PLoS ONE. 2017. V. 12. N 7. P. e0179766. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0179766
5. Song Y., Lee S., Choi Y., Han S., Won H., Sung T.-H., Choi Y., Bae J. Design framework for a seamless smart glove using a digital knitting system // Fashion and Textiles. 2021. V. 8. N 1. P. 6. https://doi.org/10.1186/s40691-020-00237-2
6. Zhou Z., Chen K., Li X., Zhang S., Wu Y., Zhou Y., Meng K., Sun C., He Q., Fan W., Fan E., Lin Z., Tan X., Deng W., Yang J., Chen J. Sign-to-speech translation using machine-learning-assisted stretchable sensor arrays // Nature Electronics. 2020. V. 3. N 9. P. 571–578. https://doi.org/10.1038/s41928-020-0428-6
7. Bernhardt P. Myo SDK Beta 7 [Электронный ресурс]. URL: https://developerblog.myo.com/myo-sdk-beta-7/ (дата обращения: 10.02.2022).
8. Abreu J.G., Teixeira J.M., Figueiredo L.S., Teichrieb V. Evaluating sign language recognition using the Myo armband // Proc. of the 18th Symposium on Virtual and Augmented Reality (SVR). 2016. P. 64–70. https://doi.org/10.1109/SVR.2016.21
9. Wang Y., Yao Q., Kwok J., Ni L.M. Generalizing from a few examples: A survey on few-shot learning // ACM Computing Surveys. 2020. V. 53. N 3. P. 63. https://dl.acm.org/doi/10.1145/3386252
10. Wang F., Zhao S., Zhou X., Li C., Li M., Zeng Z. An recognition–verification mechanism for real-time Chinese sign language recognition based on multi-information fusion // Sensors. 2019. V. 19. N 11. P. 2495. https://doi.org/10.3390/s19112495

11. Kim S., Kim J., Ahn S., Kim Y. Finger language recognition based on ensemble artificial neural network learning using armband EMG sensors. *Technology and Health Care*, 2018, vol. 26, suppl. 1, pp. 249–258. https://doi.org/10.3233/THC-174602
12. Paudyal P., Lee J., Banerjee A., Sandeep K.S. A comparison of techniques for sign language alphabet recognition using armband wearables. *ACM Transactions on Interactive Intelligent Systems*, 2019, vol. 9, no. 2-3, pp. 1–26. https://doi.org/10.1145/3150974
13. Tateno S., Liu H., Ou J. Development of sign language motion recognition system for hearing-impaired people using electromyography signal. *Sensors*, 2020, vol. 20, no. 20, pp. 5807. https://doi.org/10.3390/s20205807
14. Sheng X., Lv B., Guo W., Zhu X. Common spatial-spectral analysis of EMG signals for multiday and multiuser myoelectric interface. *Biomedical Signal Processing and Control*, 2019, vol. 53, pp. 101572. https://doi.org/10.1016/j.bspc.2019.101572
15. Zhang L., Shi Y., Wang W., Chu Y., Yuan X. Real-time and user-independent feature classification of forearm using EMG signals. *Journal of the Society for Information Display*, 2019, vol. 27, no. 2, pp. 101–107. https://doi.org/10.1002/jsid.749
16. Das P., Paul S., Ghosh J., Palbhowmik S., Neo-Gi B., Ganguly A. An approach towards the representation of sign language by electromyography signals with fuzzy implementation. *International Journal of Sensors, Wireless Communications and Control*, 2017, vol. 7, no. 1, pp. 26–32. https://doi.org/10.2174/2210327907666170222093839
17. Côté-Allard U., Fall C.L., Drouin A., Campeau-Lecours A., Gosselin C., Glette K., Laviolette F., Gosselin B. Deep learning for electromyographic hand gesture signal classification using transfer learning. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 2019, vol. 27, no. 4, pp. 760–771. https://doi.org/10.1109/TNSRE.2019.2896269
18. Tsinganos P., Cornelis B., Cornelis J., Jansen B., Skodras A. Data augmentation of surface electromyography for hand gesture recognition. *Sensors*, 2020, vol. 20, no. 17, pp. 4892. https://doi.org/10.3390/s20174892
19. Li W., Shi P., Yu H. Gesture recognition using surface electromyography and deep learning for prostheses hand: state-of-the-art, challenges, and future. *Frontiers in Neuroscience*, 2021, vol. 15, pp. 621885 https://doi.org/10.3389/fnins.2021.621885
20. Rahimian E., Zabihi S., Asif A., Farina D., Atashzar S.F., Mohammadi A. FS-HGR: Few-shot learning for hand gesture recognition via electromyography. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 2021, vol. 29, pp. 1004–1015. https://doi.org/10.1109/TNSRE.2021.3077413
21. Finn C., Abbeel P., Levine S. Model-agnostic meta-learning for fast adaptation of deep networks. *Proceedings of Machine Learning Research*, 2017, vol. 70, pp. 1126–1135.
22. Lee Y., Choi S. Gradient-based meta-learning with learned layerwise metric and subspace. *Proc. of the 35th International Conference on Machine Learning (ICML)*. V. 7, 2018, pp. 4574–4586.
23. Koch G., Zemel R., Salakhutdinov R. Siamese neural networks for one-shot image recognition. *ICML Deep Learning Workshop*. V. 2, 2015.
24. Snell J., Swersky K., Zemel R. Prototypical networks for few-shot learning. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 2017, pp. 4077–4087.
25. Vaezi Joze H.R., Koller O. MS-ASL: A large-scale data set and benchmark for understanding American sign language. *Proc. of the 30th British Machine Vision Conference (BMVC)*, 2019.
26. De Coster M., Van Herreweghe M., Dambre J. Sign language recognition with transformer networks. *Proc. 12th International Conference on Language Resources and Evaluation (LREC)*, 2020, pp. 6018–6024.
27. Pigou L., Van Herreweghe M., Dambre J. Sign classification in sign language corpora with deep neural networks. *Proc. of the International Conference on Language Resources and Evaluation (LREC)*, Workshop, 2016, pp. 175–178.
28. Pradhan A., He J., Jiang N. Performance optimization of surface electromyography based biometric sensing system for both verification and identification. *IEEE Sensors Journal*, 2021, vol. 21, no. 19, pp. 21718–21729. https://doi.org/10.1109/JSEN.2021.3079428
29. Young A.J., Hargrove L.J., Kuike T.A. Improving myoelectric pattern recognition robustness to electrode shift by changing interelectrode distance and electrode configuration. *IEEE Transactions on*

11. Kim S., Kim J., Ahn S., Kim Y. Finger language recognition based on ensemble artificial neural network learning using armband EMG sensors // Technology and Health Care. 2018. V. 26. S. 1. P. 249–258. https://doi.org/10.3233/THC-174602
12. Paudyal P., Lee J., Banerjee A., Sandeep K.S. A comparison of techniques for sign language alphabet recognition using armband wearables // ACM Transactions on Interactive Intelligent Systems. 2019. V. 9. N 2-3. P. 1–26. https://doi.org/10.1145/3150974
13. Tateno S., Liu H., Ou J. Development of sign language motion recognition system for hearing-impaired people using electromyography signal // Sensors. 2020. V. 20. N 20. P. 5807. https://doi.org/10.3390/s20205807
14. Sheng X., Lv B., Guo W., Zhu X. Common spatial-spectral analysis of EMG signals for multiday and multiuser myoelectric interface // Biomedical Signal Processing and Control. 2019. V. 53. P. 101572. https://doi.org/10.1016/j.bspc.2019.101572
15. Zhang L., Shi Y., Wang W., Chu Y., Yuan X. Real-time and user-independent feature classification of forearm using EMG signals // Journal of the Society for Information Display. 2019. V. 27. N 2. P. 101–107. https://doi.org/10.1002/jsid.749
16. Das P., Paul S., Ghosh J., Palbhowmik S., Neo-Gi B., Ganguly A. An approach towards the representation of sign language by electromyography signals with fuzzy implementation // International Journal of Sensors, Wireless Communications and Control. 2017. V. 7. N 1. P. 26–32. https://doi.org/10.2174/2210327907666170222093839
17. Côté-Allard U., Fall C.L., Drouin A., Campeau-Lecours A., Gosselin C., Glette K., Laviolette F., Gosselin B. Deep learning for electromyographic hand gesture signal classification using transfer learning // IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering. 2019. V. 27. N 4. P. 760–771. https://doi.org/10.1109/TNSRE.2019.2896269
18. Tsinganos P., Cornelis B., Cornelis J., Jansen B., Skodras A. Data augmentation of surface electromyography for hand gesture recognition // Sensors. 2020. V. 20. N 17. P. 4892. https://doi.org/10.3390/s20174892
19. Li W., Shi P., Yu H. Gesture recognition using surface electromyography and deep learning for prostheses hand: state-of-the-art, challenges, and future // Frontiers in Neuroscience. 2021. V. 15. P. 621885 https://doi.org/10.3389/fnins.2021.621885
20. Rahimian E., Zabihi S., Asif A., Farina D., Atashzar S.F., Mohammadi A. FS-HGR: Few-shot learning for hand gesture recognition via electromyography // IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering. 2021. V. 29. P. 1004–1015. https://doi.org/10.1109/TNSRE.2021.3077413
21. Finn C., Abbeel P., Levine S. Model-agnostic meta-learning for fast adaptation of deep networks // Proceedings of Machine Learning Research. 2017. V. 70. P. 1126–1135.
22. Lee Y., Choi S. Gradient-based meta-learning with learned layerwise metric and subspace // Proc. of the 35th International Conference on Machine Learning (ICML). V. 7. 2018. P. 4574–4586.
23. Koch G., Zemel R., Salakhutdinov R. Siamese neural networks for one-shot image recognition // ICML Deep Learning Workshop. V. 2. 2015.
24. Snell J., Swersky K., Zemel R. Prototypical networks for few-shot learning // Advances in Neural Information Processing Systems. 2017. P. 4077–4087.
25. Vaezi Joze H.R., Koller O. MS-ASL: A large-scale data set and benchmark for understanding American sign language // Proc. of the 30th British Machine Vision Conference (BMVC). 2019.
26. De Coster M., Van Herreweghe M., Dambre J. Sign language recognition with transformer networks // Proc. 12th International Conference on Language Resources and Evaluation. LREC. 2020. P. 6018–6024.
27. Pigou L., Van Herreweghe M., Dambre J. Sign classification in sign language corpora with deep neural networks // Proc. of the International Conference on Language Resources and Evaluation (LREC), Workshop. 2016. P. 175–178.
28. Pradhan A., He J., Jiang N. Performance optimization of surface electromyography based biometric sensing system for both verification and identification // IEEE Sensors Journal. 2021. V. 21. N 19. P. 21718–21729. https://doi.org/10.1109/JSEN.2021.3079428
29. Young A.J., Hargrove L.J., Kuike T.A. Improving myoelectric pattern recognition robustness to electrode shift by changing interelectrode distance and electrode configuration // IEEE Transactions on

*Biomedical Engineering*, 2012, vol. 59, no. 3, pp. 645–652. https://doi.org/10.1109/TBME.2011.2177662
30. Benatti S., Farella E., Gruppioni E., Benini L. Analysis of robust implementation of an EMG pattern recognition based control. *Proc. of the Analysis of Robust Implementation of an EMG Pattern Recognition Based Control (BIOSIGNALS)*, 2014, pp. 45–54. https://doi.org/10.5220/0004800300450054
31. George J.A., Neibling A., Paskett M.D., Clark G.A. Inexpensive surface electromyography sleeve with consistent electrode placement enables dexterous and stable prosthetic control through deep learning. *arXiv*, 2003, arXiv:2003.00070. https://doi.org/10.48550/arXiv.2003.00070
32. Vinyals O., Blundell C., Lillicrap T., Kavukcuoglu K., Wierstra D. Matching networks for one shot learning. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 2016, pp. 3637–3645.
33. Kaczmarek P., Mańkowski T., Tomczyński J. putEMG–A surface electromyography hand gesture recognition dataset. *Sensors*, 2019, vol. 19, no. 16, pp. 3548. https://doi.org/10.3390/s19163548

Biomedical Engineering. 2012. V. 59. N 3. P. 645–652. https://doi.org/10.1109/TBME.2011.2177662
30. Benatti S., Farella E., Gruppioni E., Benini L. Analysis of robust implementation of an EMG pattern recognition based control // Proc. of the Analysis of Robust Implementation of an EMG Pattern Recognition Based Control (BIOSIGNALS). 2014. P. 45–54. https://doi.org/10.5220/0004800300450054
31. George J.A., Neibling A., Paskett M.D., Clark G.A. Inexpensive surface electromyography sleeve with consistent electrode placement enables dexterous and stable prosthetic control through deep learning // arXiv. 2003. arXiv:2003.00070. https://doi.org/10.48550/arXiv.2003.00070
32. Vinyals O., Blundell C., Lillicrap T., Kavukcuoglu K., Wierstra D. Matching networks for one shot learning // Advances in Neural Information Processing Systems. 2016. P. 3637–3645.
33. Kaczmarek P., Mańkowski T., Tomczyński J. putEMG–A surface electromyography hand gesture recognition dataset // Sensors. 2019. V. 19. N 16. P. 3548. https://doi.org/10.3390/s19163548

## Authors

**Grigory F. Shovkoplias** — Engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, SC 57222048908, https://orcid.org/0000-0001-7777-6972, gfshovkoplias@itmo.ru

**Dmitriy A. Strokov** — Student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, https://orcid.org/0000-0003-1924-0621, dmitry.strokov@mail.ru
**Daniil V. Kasantsev** —Senior Laboratory Assistant, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, https://orcid.org/0000-0001-7974-0922, kazantsev@itkvar.ru
**Aleksandra S. Vatian** — Associate Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, SC 57191870868, https://orcid.org/0000-0002-5483-716X, alexvatyan@gmail.com
**Arip A. Asadulaev** — Assistant, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, https://orcid.org/0000-0002-2581-935X, aripasadulaev@itmo.ru
**Ivan V. Tomilov** — Senior Laboratory Assistant, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, https://orcid.org/0000-0003-1886-2867, ivan-tomilov3@yandex.ru
**Anatoly A. Shalyto** — D. Sc., Full Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, SC 57222048908, https://orcid.org/0000-0002-2723-2077, anatoly.shalyto@gmail.com

**Natalia F. Gusarova** — PhD, Senior Researcher, Associate Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, SC 57162764200, https://orcid.org/0000-0002-1361-6037, natfed@list.ru

## Авторы

**Шовкопляс Григорий Филиппович** — инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, SC 57222048908, https://orcid.org/0000-0001-7777-6972, gfshovkoplias@itmo.ru
**Строков Дмитрий Андреевич** — студент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, https://orcid.org/0000-0003-1924-0621, dmitry.strokov@mail.ru
**Казанцев Даниил Владимирович** — старший лаборант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, https://orcid.org/0000-0001-7974-0922, kazantsev@itkvar.ru
**Ватьян Александра Сергеевна** — доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, SC 57191870868, https://orcid.org/0000-0002-5483-716X, alexvatyan@gmail.com
**Асадулаев Арип Амирханович** — ассистент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, https://orcid.org/0000-0002-2581-935X, aripasadulaev@itmo.ru
**Томилов Иван Вячеславович** — старший лаборант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, https://orcid.org/0000-0003-1886-2867, ivan-tomilov3@yandex.ru
**Шалыто Анатолий Абрамович** — доктор технических наук, профессор, профессор, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, SC 57222048908, https://orcid.org/0000-0002-2723-2077, anatoly.shalyto@gmail.com
**Гусарова Наталия Федоровна** — кандидат технических наук, старший научный сотрудник, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, SC 57162764200, https://orcid.org/0000-0002-1361-6037, natfed@list.ru

*Received 11.03.2022*
*Approved after reviewing 14.04.2022*
*Accepted 15.05.2022*

*Статья поступила в редакцию 11.03.2022*
*Одобрена после рецензирования 14.04.2022*
*Принята к печати 15.05.2022*

Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ
май–июнь 2022 Том 22 № 3 http://ntv.ifmo.ru/
SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL OF INFORMATION TECHNOLOGIES, MECHANICS AND OPTICS
May–June 2022 Vol. 22 No 3 http://ntv.ifmo.ru/en/
ISSN 2226-1494 (print) ISSN 2500-0373 (online)

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК УНИВЕРСИТЕТ ИТМО
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ

doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-3-567-573

# Quantum-probabilistic SVD: complex-valued factorization of matrix data

**Shyju Kozhisseri[1], Ilya A. Surov[2]✉**

[1,2] ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

[1] 309572@niuitmo.ru, https://orcid.org/0000-0002-0212-6833
[2] ilya.a.surov@itmo.ru✉, https://orcid.org/0000-0001-5690-7507

**Abstract**

The paper reports a method for compressed representation of matrix data on the principles of quantum theory. The method is formalized as complex-valued matrix factorization based on standard singular value decomposition. The developed approach establishes a bridge between standard methods of semantic data analysis and quantum models of cognition and decision. According to the quantum theory, real-valued observable quantities are generated by wavefunctions being complex-valued vectors in multidimensional Hilbert-space. Wavefunctions are defined as superpositions of basis vectors encoding composition of semantic factors. Basis vectors are found by singular value decomposition of the initial data matrix transformed to a real-valued amplitude form. Phase-dependent superposition amplitudes are found to optimize approximation of the source data. The resulting model represents the observed real-valued data as generated from a small number of basis wavefunctions superposed with complex-valued coefficients. The method is tested for random matrices of sizes from 3 × 3 to 12 × 12 and dimensionality of latent Hilbert-space from 2 to 4. The best approximation is achieved by encoding latent factors in normalized complex-valued amplitude vectors interpreted as wavefunctions generating the data. In terms of approximation fitness, the developed method surpasses standard truncated SVD of the same dimensionality. The mean advantage over the considered range of parameters is 22 %. The method permits cognitive interpretation in accord with the existing quantum models of cognition and decision. The method can be integrated in the algorithms of semantic data analysis including natural language processing. In these tasks, the obtained improvement of approximation translates to the increased precision of similarity measures, principal component analysis, advantage in classification, and document ranking methods. Integration with quantum models of cognition and decision is expected to boost methods of artificial intelligence and machine learning improving imitation of natural thinking.

**Keywords**

quantum probability, cognitive modeling, semantic analysis, wavefunction, matrix decomposition

**Acknowledgements**

The research was funded by a grant of Russian Science Foundation (project number 20-71-001036).

**For citation:** Kozhisseri S., Surov I.A. Quantum-probabilistic SVD: complex-valued factorization of matrix data. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2022, vol. 22, no. 3, pp. 567–573. doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-3-567-573

УДК 004.82

# Комплекснозначное разложение матричных данных на принципах квантовой теории

**Шиджу Кожиссери[1], И.А. Суров[2]✉**

[1,2] Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

[1] 309572@niuitmo.ru, https://orcid.org/0000-0002-0212-6833
[2] ilya.a.surov@itmo.ru✉, https://orcid.org/0000-0001-5690-7507

**Аннотация**

**Предмет исследования.** Представлен метод сжатого представления матричных данных на принципах квантовой теории. Данные имеют вид таблицы численных значений набора величин в ряде экспериментов. Метод формализован в виде факторизации данных на основе сингулярного разложения, обобщенного на

© Kozhisseri S., Surov I.A., 2022

поле комплексных чисел. Рассмотрена возможность интерпретации разработанного метода в соответствии с принципами квантовой когнитивистики. **Метод.** В соответствии с квантовой теорией, действительные величины в исходных данных порождаются волновыми функциями в виде комплекснозначных векторов в многомерном гильбертовом пространстве. Волновые функции определяются суперпозициями базисных векторов, представляющими композицию семантических факторов. Базисные вектора рассчитываются с помощью сингулярного разложения матрицы исходных данных, приведенной к амплитудной форме. Комплекснозначные коэффициенты разложения определяются по условию наилучшей аппроксимации исходных данных. **Основные результаты.** Метод апробирован на случайно сгенерированных матрицах размером от 3 × 3 до 12 × 12 и размерностях сжатого гильбертова пространства от 2 до 4. Наилучшая точность приближения достигается при использовании в качестве элементов разложения нормированных комплекснозначных векторов, выполняющих роль порождающих волновых функций. Полученная точность во всех случаях превосходит точность приближения стандартным методом усеченного сингулярного разложения. Среднее повышение точности на исследованном интервале параметров составило 22 %. Метод допускает когнитивную интерпретацию, совместимую с квантовыми моделями поведения и принятия решений. **Практическая значимость.** Представленный метод применим в задачах семантического анализа данных, включая задачи обработки естественного языка. В этих приложениях полученный результат может быть использован для повышения точности выделения главных смысловых компонент, совершенствования методов классификации и ранжирования текстовых документов. Возможность когнитивной интерпретации и формализация в форме матричного разложения открывает подходы к дальнейшему использованию моделей квантовой когнитивистики в задачах анализа данных. Ожидается, что встраивание квантовой логики на основе комплекснозначного вероятностного исчисления в алгоритмы машинного обучения и искусственного интеллекта позволит имитировать работу естественных когнитивных систем.

**Ключевые слова**
квантовая вероятность, волновая функция, когнитивное моделирование, семантический анализ, матричное разложение

**Благодарности**
Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 20-71-00136).

**Ссылка для цитирования:** Кожиссери Ш., Суров И.А. Комплекснозначное разложение матричных данных на принципах квантовой теории // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2022. Т. 22, № 3. С. 567–573 (на англ. яз.) doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-3-567-573

## Introduction

Most of the existing methods of data science represent features of the analyzed data by real numbers. Recent progress in cognitive-behavioral modeling, however, calls into question the appropriateness of this choice. Namely, quantum models of human behavior show the advantage of encoding cognitive factors by complex-valued amplitudes related to the observable quantities by quantum-theoretic Born's rule. The resulting probabilistic structure captures regularities of human behavior better than classical probability, making progress in problems challenging classical approaches [1–5]. When data originate from human behavior (e.g., for texts in natural language, social and economic statistics), complex-valued quantum-probabilistic structure is then expected to improve performance of the existing methods of analysis.

In this paper we focus on a Singular Value Decomposition (SVD) used to approximate a two-dimensional array of data as a product of smaller size matrices encoding "semantic" structure behind the observed data. Using real-valued calculus by default, this procedure is a mathematical core of latent semantic analysis of natural language [6–8]. As motivated above, we turn SVD from classical to complex-valued structure, while keeping its basic matrix-factorization idea.

## Stage 1: real-valued amplitude-wise SVD

Source data have a form of a real-valued matrix $\mathbf{P}$ with $M$ rows and $N$ columns. Rows of matrix $\mathbf{P}$ stand for $M$ target features that can have two outcomes, say 0 and 1. Columns are $N > M$ experiments in which these features are observed. Real positive element $\mathbf{P}[i, j] = p_{ij}$ is the probability of observing feature $i$ in experiment $j$, normalized such that total probability of all features in each experiment is unity:

$$||\mathbf{p}_j||_1 = \sum_{i=1}^{M} p_{ij} = 1. \quad (1)$$

Vector $\mathbf{p}_j$ can be interpreted as a probabilistic profile of the observed features in experiment $j$. Normalized matrix $\mathbf{P}$ is then converted to the *amplitude* matrix $\mathbf{A}$ by element-wise square root

$$a_{ij} = \sqrt{p_{ij}},\ a_{ij} \in R^{+} \quad (2)$$

so that the probability vectors $\mathbf{p}_j$ are transformed to the real-valued amplitude column forming matrix $\mathbf{A}$.

Next, matrix $\mathbf{A}$ is approximated by a product

$$\tilde{\mathbf{A}} = \mathbf{U_t} \times \mathbf{\Lambda_t} \times \mathbf{V_t}, \quad (3)$$

where $\mathbf{U_t}$, $\mathbf{\Lambda_t}$ and $\mathbf{V_t}$ are truncated versions of the real-valued matrices obtained from standard SVD shown in Fig. 1. Namely, matrix $\mathbf{U_t}$ consists of $K \le M$ orthogonal columns, $\mathbf{V_t}$ consists of $K$ orthogonal rows, and $\lambda_i$ are the corresponding eigenvalues. Decomposition (3) approximates initial amplitude matrix $\mathbf{A}$ optimally in the least-squares sense [6, 9].

Return to the probabilities is realized by element-wise squaring of the approximated amplitudes $\tilde{\mathbf{A}}^2$ inverting the relation (2). The result is different from the approximation $\tilde{\mathbf{P}}$ obtained from standard SVD applied directly to the

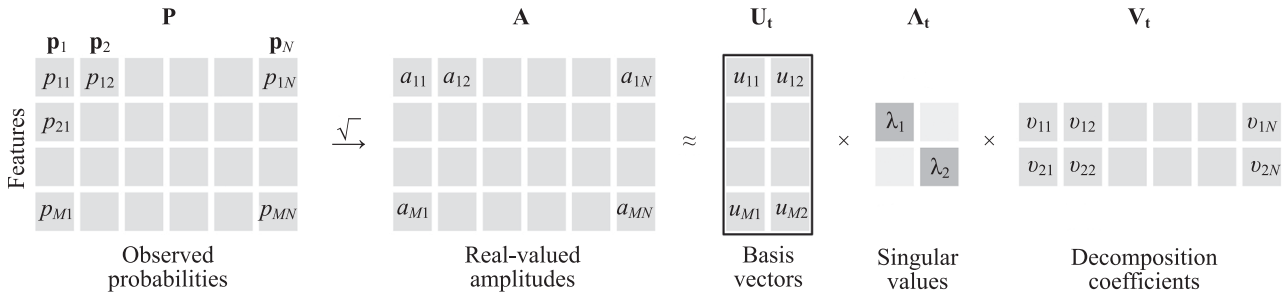



*Fig. 1*. Amplitude-wise singular value decomposition. First, normalized source probability data **P** (1) are converted by element-wise square root (2) to positive real amplitudes **A**. This matrix is approximated by standard SVD truncated to $K$ largest eigenvalues (3). Shown is the case $N = 6$, $M = 4$, $K = 2$

source data and truncated to the same dimension $K$. The latter approximates the source data more accurately, as measured by the Frobenius norm $||\cdot||$:

$$d_{\text{SVD}} = ||\mathbf{P} - \tilde{\mathbf{P}}|| < ||\mathbf{P} - \tilde{\mathbf{A}}^2||. \tag{4}$$

This measure is used to estimate the advantage of the developed method in section "Testing".

### Stage 2: Complex-valued factorization

Advantage over the standard SVD (4) is achieved by extending the domain of the amplitude matrix **A** to complex numbers. Observable probabilities are then generated from a complex-valued matrix **Ψ** by element-wise application of the Born's rule generalizing square-root relation (2)

$$\mathbf{P}_{\text{exp}} = |\mathbf{\Psi}|^2, \qquad p_{ij} = |\psi_{ij}|^2. \tag{5}$$

Matrix **Ψ** is factorized in the product

$$\mathbf{\Psi} = \mathbf{U_t} \times \mathbf{C}, \tag{6}$$

where $\mathbf{U_t}$ is the same as in (3), while matrix **C** consists of $N$ complex-valued column vectors $|\mathbf{c}_j\rangle$ of length $K$ as shown in Fig. 2.

Column vectors of **Ψ** are superpositions

$$|\mathbf{\Psi}_j\rangle = \mathbf{U}_t|\mathbf{c}_j\rangle = \sum_{i=1}^{K} c_{ij}|\mathbf{u}_i\rangle. \tag{7}$$

As required by (1), these vectors are normalized as

$$\langle\boldsymbol{\psi}_j|\boldsymbol{\psi}_j\rangle = \langle\mathbf{c}_j|\mathbf{c}_j\rangle = 1, \tag{8}$$

where row vector $\langle\cdot|$ is conjugate (Hermitian) transpose of $|\cdot\rangle$ in quantum-theoretic bra-ket notation. Accordingly, vectors $|\boldsymbol{\psi}_j\rangle$ play the role of *wavefunctions* generating probabilistic profiles $\mathbf{p}_j$ in each of $N$ experiments.

As in quantum physics [10], $K$ mutually orthogonal real-valued columns $|\mathbf{u}_i\rangle$ of matrix $\mathbf{U_t}$ are interpreted as *stationary* cognitive states of the (behavioral) system that generated the data. They function as an incomplete set of basis vectors in $M$-dimensional Hilbert-space $H_M$ accommodating wavefunctions $|\boldsymbol{\psi}_j\rangle$. $K$-dimensional subspace $H_K$ they span is a complex-valued version of a low-dimensional semantic space used in latent semantic analysis [6–8]. Normalized vectors $|\mathbf{c}_j\rangle$ in this space are cognitive wavefunctions representing behavioral data in compressed "semantic" form.

### Stage 3: Finding the coefficients

Coefficient matrix **C** in (6) is sought to obtain the wavefunction matrix **Ψ** that would reproduce source data **P** in the best possible way. Namely,

$$\mathbf{C} = \text{argmin}||\mathbf{P} - \mathbf{P}_{\text{exp}}||, \tag{9}$$

where $\mathbf{P}_{\text{exp}}$ is the matrix of explained probabilities generated by element-wise Born's rule (5), and $||\cdot||$ is the Frobenius (Hilbert-Schmidt) matrix norm. Definition (9)

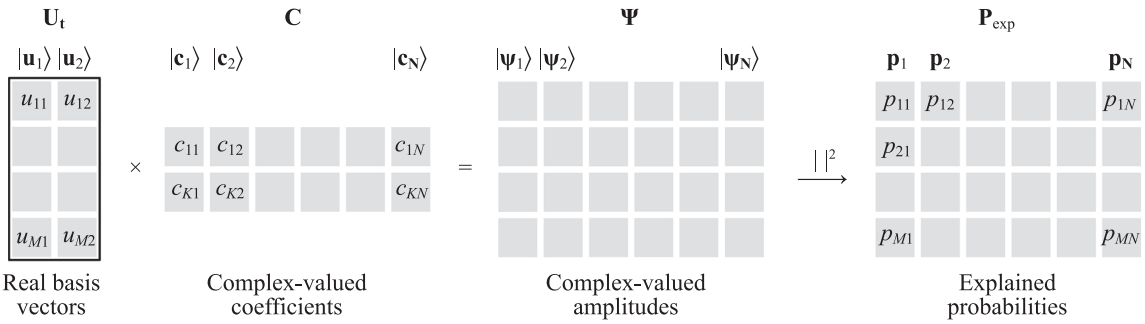



*Fig. 2*. Scheme of the complex-valued matrix factorization (6). Real-valued basis vectors $|\mathbf{u}_i\rangle$ obtained from amplitude-wise truncated SVD (Fig. 1) are superposed with $N$ complex-valued coefficient vectors $|\mathbf{c}_j\rangle$ forming the matrix **C** of shape $K \times N$. This produces $N$ wavefunctions $|\boldsymbol{\psi}_j\rangle$ (7) generating the explained probabilities $\mathbf{P}_{\text{exp}}$ via the Born's rule (5). Coefficients **C** are set to minimize the Frobenius distance between explained and actual probability matrices. As in Fig. 1, shown is the case $N = 6$, $M = 4$, $K = 2$

prescribes to find $N$ complex-valued vectors $|\mathbf{c}_j\rangle$ of length $K$ satisfying normalization (8). Each component $c_{ij}$ is encoded by magnitude $r$ and phase φ, both being real numbers, whereas phase of one $c_{ij}$ in every $|\mathbf{c}_j\rangle$ is set to zero due to insensitivity of the observable probabilities to the global phase factor. In total, this results in

$$2N(K-1) \tag{10}$$

real-valued parameters sought to minimize distance between the explained and actual data (9). This problem is addressed by standard numerical optimization methods. We used the Nelder-Mead algorithm from SciPy library [11] applied for $N$ independent optimization problems of $2(K-1)$ dimensions for each vector $|\mathbf{c}_j\rangle$.

## Testing

This section summarizes approbation of the developed algorithm. The first test validates normalization of the complex-valued vectors in (7) and (8), supporting their interpretation as wavefunctions of data. Tests 2 and 3 quantify improvement of the data approximation achieved by the developed method relative to its real-valued version and the standard SVD.

**Test 1: normalization**

Normalization of coefficients $c_{ij}$ in (7) is due to interpretation of vectors $|\mathbf{c}_j\rangle$ as wavefunctions of experimental data in $K$-dimensional latent space. This choice is verified by lifting restriction (8) and allowing vectors $|\mathbf{c}_j\rangle$ to have arbitrary lengths

$$r_j = \sqrt{\langle c_j | c_j \rangle}. \tag{11}$$

Compared to (10), this adds one additional parameter for each of $N$ vectors $|\mathbf{c}_j\rangle$, so that the total number of optimization variables becomes $N(2K-1)$. Histogram of the resulting values (11) from 2000 optimized vectors is shown in Fig. 3. The mean and standard deviation of this statistics

$$r_j = 1.002 + 0.016 \tag{12}$$

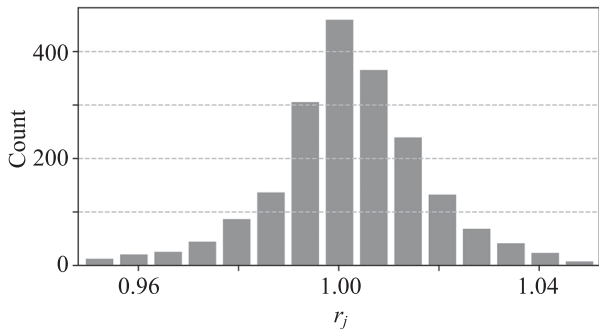



*Fig. 3*. Distribution of 2000 coefficient vector lengths (11) obtained in complex-valued decomposition of random data with shape $N = 6$, $M = 4$, and truncation to $K = 2$ basis dimensions. Heights of the bars show the number of the values falling in the corresponding bins. The mean value is sharply peaked at unity (12) in agreement with normalization (8)

indicate that in agreement with quantum-theoretic reason normalization (8) simplifies representation without degrading its accuracy.

**Test 2: real-complex difference for the same algorithm**

This test quantifies how generalization to complex numbers improves quality of the approximation obtained from the same form of matrix decomposition. Namely, complex-valued algorithm shown in Fig. 2 is compared with its performance when the coefficient matrix $\mathbf{C}$ in optimization (9) is limited to real numbers. In this latter case, real-valued amplitude matrix $\mathbf{\Psi}_R$ approximates the source data with Frobenius distance

$$d_{\text{real}} = \|\mathbf{P} - \mathbf{\Psi}_R^2\|$$

analogous to (4). This value is compared with the distance obtained from the complex-valued version of an algorithm

$$d_{\text{complex}} = \|\mathbf{P} - |\mathbf{\Psi}|^2\| \tag{13}$$

by relative improvement

$$R_1 = \frac{d_{\text{real}} - d_{\text{complex}}}{d_{\text{real}}}. \tag{14}$$

This quantity is measured for truncation numbers $K$ ranging from 2 to 4 and sizes $N$ and $M$ of the source data matrix $\mathbf{P}$ ranging from $K+1$ to $K+8$. In each set ($K$, $N$, $M$), independent optimizations producing $d_{\text{real}}$ and $d_{\text{complex}}$ were performed for 100 randomly generated matrices $\mathbf{P}$.

The resulting values (14) are shown in Fig. 4. The largest improvements are achieved for the smallest $N$ and $M$ close to $K$. For each $K$, decreasing of $R_1$ as a function of $M$ is due to an increasing number of features addressed by the same number of the optimized phase factors. Averaging of $R_1$ over all $N$ and $M$ for $K = 2, 3, 4$ produces mean relative improvements of 41 %, 56 %, and 75 %, respectively. To compare, the mean difference between the sides of inequality (4) over the same range of parameters is 6 %.

**Test 3: quantum-probabilistic decomposition and standard truncated SVD**

In this test, the quantum-probabilistic scheme shown in Fig. 2 is compared with the standard truncated SVD. The corresponding distances (13) and (4) are compared by relative improvement

$$R_2 = \frac{d_{\text{SVD}} - d_{\text{complex}}}{d_{\text{SVD}}}. \tag{15}$$

Identically to the previous one, this test is performed for $K = 2, 3, 4$ and sizes of source data $N$ and $M$ ranging from $K+1$ to $K+8$. The obtained color maps, analogous to shown in Fig. 4, indicate that improvement (15) is largely independent on $N$. Therefore, these data are shown in Fig. 5 as functions of $M$ for each $K$. As in the test 2, the largest improvements are observed for the number of features $M = K+1$ reaching ≈80 % for $K = 4$. Average improvement over all $K = 2, 3, 4$ is $\langle R_2 \rangle = 22$ %.

Test 3 is significant in two aspects. First, it shows the advantage over widely used baseline method of semantic data analysis. Test 2, in contrast, compares the developed

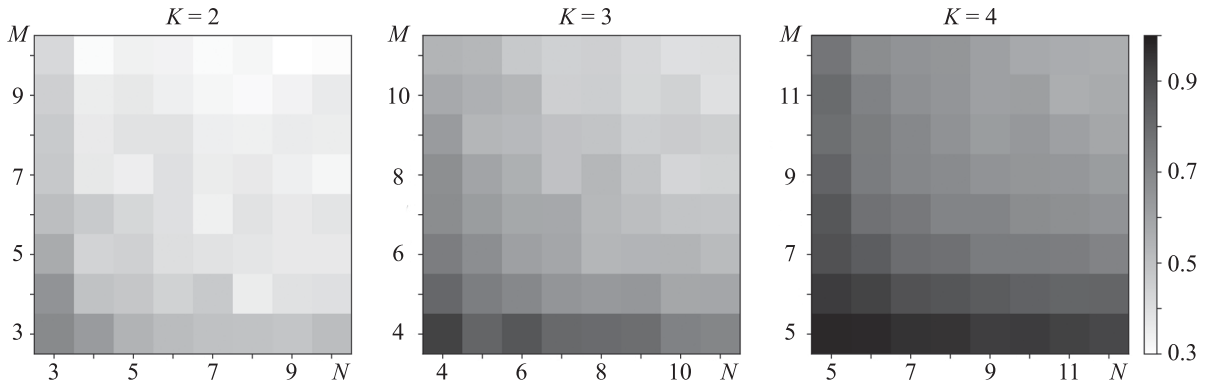



*Fig. 4*. Advantage in approximation fitness achieved by complex-valued decomposition (Fig. 2) over its real-valued version. Color maps show relative improvement (14) for $K = 2, 3, 4$ with the number of experiments $N$ (horizontal axis) and the number of features $M$ (vertical axis) ranging from $K + 1$ to $K + 8$ in each case

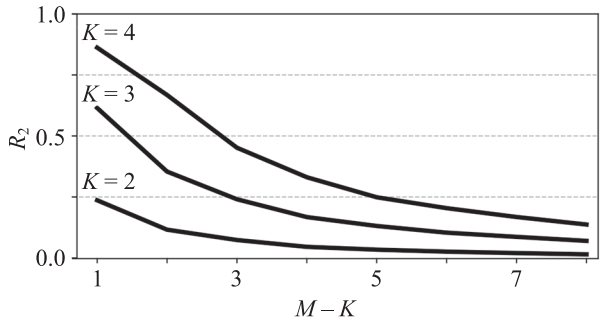



*Fig. 5*. Relative improvement (15) quantifying the advantage of the developed algorithm over the standard SVD approximation truncated to the same number of latent factors $K$

algorithm with its real-valued version realized specifically to explicate the difference brought in by using complex numbers. The resulting improvement shown in Fig. 4 is then explainable by the larger number of parameters in the complex-valued version, adding the new (phase) degrees of freedom.

Results of test 3 are not explained by this argument. For $K = 2$, for example, the total numbers of parameters in both algorithms are equal: matrix $\mathbf{C}$ (Fig. 2) and the product $\mathbf{\Lambda_t} \times \mathbf{V_t}$ in standard SVD (Fig. 1) have the same number of parameters $2N$ (10). Higher approximation fitness in this case is then due to more efficient use of these parameters by the developed algorithm. Analogous advantage of the quantum-probabilistic approach is observed for the Hilbert-space model of semantics of natural language [12].

## Discussion

Although the quantum-probabilistic structure was previously used mostly to model of human-generated (behavioral) data, the obtained result shows its advantage even for the pseudo-random matrices taken for testing above. In this case, the obtained model works in "as if" mode, suggesting a cognitive structure of a living agent that might generate the considered data. This process is the essence of an "intentional stance", virtually endowing behavior with human-like subjectness [13].

Formally, the obtained improvement in accuracy is due to phase degrees of freedom allowing account of non-linear composition of probabilistic factors by linear superposition of the basis wavefunctions. Analogous to similar method [14], this aligns with previous results showing that this "interference effect" is necessary for modeling of data not restricted to rational Boolean logic [15]. Within the intentional stance, interference accounts for regularities of semantic composition, central in modeling of natural language, information retrieval, and artificial intelligence in general [16–23]. The obtained result connects these methods to classical LSA and its successors [24, 25]. In this perspective, phase degrees of freedom account for subjectivity of meaning non-predetermined by the input data, thereby allowing modeling of alternative interpretations of the same factuality.

## Conclusion

The obtained result shows the benefit of turning from real- to complex-valued calculus in the baseline method of data analysis. Better approximation of data with the same number of parameters reveals fundamental advantage of quantum-theoretic calculus for compressed representation of information. This advantage can be projected to other methods of data analysis, processing of natural language, and algorithms of artificial intelligence. Analogous to LSA and SVD considered here, these areas can harness the advantage of the Hilbert-space probability structure.

**References**

1. Surov I.A., Alodjants A.P. *Decision-making models in quantum cognitive science*. ITMO University, 2018, 63 p. (in Russian)
2. Khrennikov A. Quantum-like modeling of cognition. *Frontiers in Physics*, 2015, vol. 3, pp. 77. https://doi.org/10.3389/fphy.2015.00077
3. Khrennikov A. *Ubiquitous Quantum Structure: From Psychology to Finance.* Springer, 2010, 216 p. https://doi.org/10.1007/978-3-642-05101-2
4. Busemeyer J.R., Bruza P.D. *Quantum Models of Cognition and Decision*. Cambridge University Press, 2012, 426 p.
5. Melucci M. *Introduction to Information Retrieval and Quantum Mechanics*. Springer, 2015, 232 p. https://doi.org/10.1007/978-3-662-48313-8
6. Dumais S.T. Latent semantic analysis. *Annual Review of Information Science and Technology*, 2004, vol. 38, no. 1, pp. 188–230. https://doi.org/10.1002/aris.1440380105
7. Deerwester S., Dumais S.T., Landauer T.K., Furnas G.W., Harshman R.A. Indexing by latent semantic analysis. *Journal of the American Society for Information Science*, 1990, vol. 41, no. 6, pp. 391–407. https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-4571(199009)41:6<391::AID-ASI1>3.0.CO;2-9
8. Landauer T.K., Dumais S.T. A solution to Plato's problem: The latent semantic analysis theory of acquisition, induction, and representation of knowledge. *Psychological Review*, 1997, vol. 104, no. 2, pp. 211–240. https://doi.org/10.1037/0033-295X.104.2.211
9. Forsythe G.E., Malcolm M.A., Moler C.B. *Computer Methods for Mathematical Computations.* Prentice Hall, 1977, 259 p.
10. Bohm D., Hiley B.J. *The Undivided Universe: An Ontological Interpretation of Quantum Theory*. Routledge, 1993, 397 p.
11. Virtanen P., Gommers R., Oliphant T.E. et al. SciPy 1.0: fundamental algorithms for scientific computing in Python. *Nature Methods*, 2020, vol. 17, no. 3, pp. 261–272. https://doi.org/10.1038/s41592-019-0686-2
12. Wang B., Li Q., Melucci M., Song D. Semantic Hilbert space for text representation learning. *Proc. of the World Wide Web Conference (WWW)*, 2019, pp. 3293–3299. https://doi.org/10.1145/3308558.3313516
13. Papagni G., Koeszegi S. A pragmatic approach to the intentional stance semantic, empirical and ethical considerations for the design of artificial agents. *Minds and Machines*, 2021, vol. 31, no. 4, pp. 505–534. https://doi.org/10.1007/s11023-021-09567-6
14. González F.A., Caicedo J.C. Quantum latent semantic analysis. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 2011, vol. 6931, pp. 52–63. https://doi.org/10.1007/978-3-642-23318-0_7
15. Khrennikov A. Quantum-like model of cognitive decision making and information processing. *BioSystems*, 2009, vol. 95, no. 3, pp. 179–187. https://doi.org/10.1016/j.biosystems.2008.10.004
16. Aerts D., Czachor M. Quantum aspects of semantic analysis and symbolic artificial intelligence. *Journal of Physics A: Mathematical and General*, 2004, vol. 37, no. 12, pp. 123–132. https://doi.org/10.1088/0305-4470/37/12/L01
17. Bruza P.D., Coley R.J. Quantum logic of semantic space: An exploratory investigation of context effects in practical reasoning. *We Will Show Them: Essays in Honour of Dov Gabbay*. Ed. by S. Artemov, H. Barringer, S.A. d'Avila Garcez, L.C. Lamb, J. Woods. College Publications, 2005, pp. 339–361.
18. Aerts D., Sozzo S., Veloz T. Quantum structure of negation and conjunction in human thought. *Frontiers in Psychology*, 2015, vol. 6, pp. 1447. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.01447
19. Li J., Zhang P., Song D., Hou Y. An adaptive contextual quantum language model. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2016, vol. 456, pp. 51–67. https://doi.org/10.1016/j.physa.2016.03.003
20. Surov I.A., Semenenko E., Platonov A.V., Bessmertny I.A., Galofaro F., Toffano Z., Khrennikov A., Alodjants A.P. Quantum semantics of text perception. *Scientific Reports*, 2021, vol. 11, no. 1, pp. 4193. https://doi.org/10.1038/s41598-021-83490-9
21. Shaker A., Bessmertny I., Miroslavskaya L.A., Koroleva J.A. A quantum-like semantic model for text retrieval in Arabic. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2021, vol. 21, no. 1, pp. 102–108. (in Russian). https://doi.org/10.17586/2226-1494-2021-21-1-102-108

**Литература**

1. Суров И.А., Алоджанц А.П. Модели принятия решений в квантовой когнитивистике: учебное пособие. СПб.: Университет ИТМО, 2018. 63 с.
2. Khrennikov A. Quantum-like modeling of cognition // Frontiers in Physics. 2015. V. 3. P. 77. https://doi.org/10.3389/fphy.2015.00077
3. Khrennikov A. Ubiquitous Quantum Structure: From Psychology to Finance. Springer, 2010. 216 p. https://doi.org/10.1007/978-3-642-05101-2
4. Busemeyer J.R., Bruza P.D. Quantum Models of Cognition and Decision. Cambridge University Press, 2012. 426 p.
5. Melucci M. Introduction to Information Retrieval and Quantum Mechanics. Springer, 2015. 232 p. https://doi.org/10.1007/978-3-662-48313-8
6. Dumais S.T. Latent semantic analysis // Annual Review of Information Science and Technology. 2004. V. 38. N 1. P. 188–230. https://doi.org/10.1002/aris.1440380105
7. Deerwester S., Dumais S.T., Furnas G.W., Landauer T.K., Harshman R.A. Indexing by latent semantic analysis // Journal of the American Society for Information Science. 1990. V. 41. N 6. P. 391–407. https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-4571(199009)41:6<391::AID-ASI1>3.0.CO;2-9
8. Landauer T.K., Dumais S.T. A solution to Plato's problem: The latent semantic analysis theory of acquisition, induction, and representation of knowledge // Psychological Review. 1997. V. 104. N 2. P. 211–240. https://doi.org/10.1037/0033-295X.104.2.211
9. Forsythe G.E., Malcolm M.A., Moler C.B. Computer Methods for Mathematical Computations. Prentice Hall, 1977. 259 p.
10. Bohm D., Hiley B.J. The undivided universe: An ontological interpretation of quantum theory. Routledge, 1993. 397 p.
11. Virtanen P., Gommers R., Oliphant T.E. et al. SciPy 1.0: fundamental algorithms for scientific computing in Python // Nature Methods. 2020. V. 17. N 3. P. 261–272. https://doi.org/10.1038/s41592-019-0686-2
12. Wang B., Li Q., Melucci M., Song D. Semantic Hilbert space for text representation learning // Proc. of the World Wide Web Conference (WWW). 2019. P. 3293–3299. https://doi.org/10.1145/3308558.3313516
13. Papagni G., Koeszegi S. A pragmatic approach to the intentional stance semantic, empirical and ethical considerations for the design of artificial agents // Minds and Machines. 2021. V. 31. N 4. P. 505–534. https://doi.org/10.1007/s11023-021-09567-6
14. González F.A., Caicedo J.C. Quantum latent semantic analysis // Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). 2011. V. 6931. P. 52–63. https://doi.org/10.1007/978-3-642-23318-0_7
15. Khrennikov A. Quantum-like model of cognitive decision making and information processing // BioSystems. 2009. V. 95. N 3. P. 179–187. https://doi.org/10.1016/j.biosystems.2008.10.004
16. Aerts D., Czachor M. Quantum aspects of semantic analysis and symbolic artificial intelligence // Journal of Physics A: Mathematical and General. 2004. V. 37. N 12. P. 123–132. https://doi.org/10.1088/0305-4470/37/12/L01
17. Bruza P.D., Coley R.J. Quantum logic of semantic space: An exploratory investigation of context effects in practical reasoning // We Will Show Them: Essays in Honour of Dov Gabbay / ed. by S. Artemov, H. Barringer, S.A. d'Avila Garcez, L.C. Lamb, J. Woods. College Publications, 2005. P. 339–361.
18. Aerts D., Sozzo S., Veloz T. Quantum structure of negation and conjunction in human thought // Frontiers in Psychology. 2015. V. 6. P. 1447. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.01447
19. Li J., Zhang P., Song D., Hou Y. An adaptive contextual quantum language model // Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. 2016. V. 456. P. 51–67. https://doi.org/10.1016/j.physa.2016.03.003
20. Surov I.A., Semenenko E., Platonov A.V., Bessmertny I.A., Galofaro F., Toffano Z., Khrennikov A., Alodjants A.P. Quantum semantics of text perception // Scientific Reports. 2021. V. 11. N 1. P. 4193. https://doi.org/10.1038/s41598-021-83490-9
21. Шакер А., Бессмертный И.А., Мирославская Л.А., Королёва Ю.А. Квантовая семантическая модель поиска текста на арабском языке // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2021. Т. 21. № 1. С. 102–108. https://doi.org/10.17586/2226-1494-2021-21-1-102-108

22. Platonov A., Bessmertny I., Koroleva J., Miroslavskaya L., Shaker A. Vector representation of words using quantum-like probabilities. *Studies in Systems, Decision and Control*, 2021, vol. 337, pp. 535–546. https://doi.org/10.1007/978-3-030-65283-8_44
23. Widdows, D., Kitto, K., & Cohen, T. Quantum Mathematics in Artificial Intelligence. *Journal of Artificial Intelligence Research*. 2021, vol. 72, pp. 1307–1341. https://doi.org/10.1613/jair.1.12702
24. Hofmann T. Unsupervised learning by probabilistic Latent Semantic Analysis. *Machine Learning*. 2001, vol. 42, no 1–2, pp. 177–196. https://doi.org/10.1023/A:1007617005950
25. Vorontsov K., Potapenko A. Additive regularization of topic models. *Machine Learning*. 2015, vol. 101, no 1–3, pp. 303–323. https://doi.org/10.1007/s10994-014-5476-6

22. Platonov A., Bessmertny I., Koroleva J., Miroslavskaya L., Shaker A. Vector representation of words using quantum-like probabilities // Studies in Systems, Decision and Control. 2021. V. 337. P. 535–546. https://doi.org/10.1007/978-3-030-65283-8_44
23. Widdows, D., Kitto, K., & Cohen, T. Quantum Mathematics in Artificial Intelligence. Journal of Artificial Intelligence Research. 2021. V. 72. P. 1307–1341. https://doi.org/10.1613/jair.1.12702
24. Hofmann T. Unsupervised learning by probabilistic Latent Semantic Analysis // Machine Learning. 2001. V. 42. N 1–2. P. 177–196. https://doi.org/10.1023/A:1007617005950
25. Vorontsov K., Potapenko A. Additive regularization of topic models // Machine Learning. 2015. V. 101. N 1–3. P. 303–323. https://doi.org/10.1007/s10994-014-5476-6

## Authors

**Shyju Kozhisseri** — Student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, https://orcid.org/0000-0002-0212-6833, 309572@niuitmo.ru
**Ilya A. Surov** — PhD (Physics & Mathematics), Senior Researcher, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, SC 57219761715, https://orcid.org/0000-0001-5690-7507, ilya.a.surov@itmo.ru

## Авторы

**Кожиссери Шиджу** — студент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, https://orcid.org/0000-0002-0212-6833, 309572@niuitmo.ru
**Суров Илья Алексеевич** — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, SC 57219761715, https://orcid.org/0000-0001-5690-7507, ilya.a.surov@itmo.ru

*Received 01.03.2022*
*Approved after reviewing 19.04.2022*
*Accepted 29.05.2022*

*Статья поступила в редакцию 01.03.2022*
*Одобрена после рецензирования 19.04.2022*
*Принята к печати 29.05.2022*

Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ
май–июнь 2022 Том 22 № 3 http://ntv.ifmo.ru/
SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL OF INFORMATION TECHNOLOGIES, MECHANICS AND OPTICS
May–June 2022 Vol. 22 No 3 http://ntv.ifmo.ru/en/
ISSN 2226-1494 (print) ISSN 2500-0373 (online)

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК УНИВЕРСИТЕТ ИТМО
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ

doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-3-574-584

# Modelling of basic Indonesian Sign Language translator based on Raspberry Pi technology

**Umi Fadlilah[1]✉, Raden Adrian Rafli Prasetyo[2], Abd Kadir Mahamad[3], Bana Handaga[4], Sharifah Saon[5], Endah Sudarmilah[6]**

[1,2,4,6] Universitas Muhammadiyah Surakarta, Surakarta, 57169, Indonesia,
[1,3,5] Universiti Tun Hussein Onn Malaysia, Batu Pahat, Johor, 86400, Malaysia

[1] uf138@ums.ac.id✉, https://orcid.org/0000-0002-2261-3663
[2] adrian.raflip@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-8747-9437
[3] kadir@uthm.edu.my, https://orcid.org/0000-0002-3985-6549
[4] bana.handaga@ums.ac.id, https://orcid.org/0000-0001-6797-6233
[5] sharifa@uthm.edu.my, https://orcid.org/0000-0003-2706-3258
[6] Endah.Sudarmilah@ums.ac.id, https://orcid.org/0000-0002-9244-4762

**Abstract**

Deaf people have hearing loss from mild to very severe. Such people have difficulty processing language information both with and without hearing aids. Deaf people who do not use hearing aids use sign language in their everyday conversations. At the same time, it is difficult for general people to communicate with the deaf, so in order to communicate with the deaf they must know sign language. There are two sign languages in Indonesia, namely SIBI (Indonesian Sign Language System) and BISINDO (Indonesian Sign Language). To help with communication between deaf and normal people, we developed a model using the one-handed SIBI method as an example, and then further developed it using the one-handed and two-handed BISINDO. The main function of the method is the recognition of basic letters, words, sentences and numbers using a Raspberry Pi single-board computer and a camera which are designed to detect the movements of language gestures. With the help of a special program, images are translated into text on the monitor screen. The method used is image processing and machine learning using the Python programming language and Convolutional Neural Network techniques. The device prototype issues a warning to repeat the sign language if the translation fails, and delete the translation if it doesn't match the database. The prototype of the device requires further development providing its flexibility: to provide reading of dynamic movements, facial expressions, to provide translation of words not included in the existing database. You need to add a database other than SIBI, such as BISINDO, or sign languages from other regions or countries.

**Keywords**

CNN, deaf people, droidcam, image processing, machine learning, Python, Raspberry Pi, SIBI, sign language, smartphone camera, webcam

**Acknowledgements**

This work was supported by a research grant TIER 1, H917.
The researchers thank all those who contributed to the preparation of the work, especially the UMS (Muhammadiyya University Surakarta) Electrical and Electronics Engineering Curriculum and Tun Hussein Onn Malaysia (UTHM) Electrical Engineering Curriculum, Research Management. We thank the Center, which contributed to the implementation and testing of this study.

**For citation:** Fadlilah U., Prasetyo R.A.R., Mahamad A.K., Handaga B., Saon S., Sudarmilah E. Modelling of basic Indonesian Sign Language translator based on Raspberry Pi technology. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2022, vol. 22, no. 3, pp. 574–584. doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-3-574-584

© Fadlilah U., Prasetyo R.A.R., Mahamad A.K., Handaga B., Saon S., Sudarmilah E., 2022

УДК 004.89

# Моделирование базового переводчика индонезийского языка жестов на одноплатном компьютере Raspberry Pi

**Уми Фадлила[1]✉, Раден Адриан Рафли Прасетьо[2], Абд Кадир Махамад[3], Бана Хандага[4], Шарифа Саон[5], Энда Судармила[6]**

[1,2,4,6] Университет Мухаммадия Сураката, Сураката, 57169, Индонезия
[1,3,5] Университет Тун Хусейн Онн Малайзия, Бату Пахат, Джохор, 86400, Малайзия

[1] uf138@ums.ac.id✉, https://orcid.org/0000-0002-2261-3663
[2] adrian.raflip@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-8747-9437
[3] kadir@uthm.edu.my, https://orcid.org/0000-0002-3985-6549
[4] bana.handaga@ums.ac.id, https://orcid.org/0000-0001-6797-6233
[5] sharifa@uthm.edu.my, https://orcid.org/0000-0003-2706-3258
[6] Endah.Sudarmilah@ums.ac.id, https://orcid.org/0000-0002-9244-4762

**Аннотация**

Глухие люди имеют потерю слуха от легкой формы до очень тяжелой. Такие люди испытывают трудности при обработке языковой информации, как со слуховыми аппаратами, так и без них. Глухие люди, которые не применяют слуховые аппараты, в своих повседневных разговорах используют язык жестов. В то же время здоровым людям трудно общаться с глухими, поэтому для общения они должны знать язык жестов. В Индонезии существует два жестовых языка, а именно Indonesian Sign Language System (SIBI) и Indonesian Sign Language (BISINDO). Разработана модель для помощи в общении между глухими и здоровыми людьми. Модель рассмотрена на примере использования одноручного метода SIBI и доработана с использованием одноручного и двуручного BISINDO. Основная функция метода — распознавание основных букв, слов, предложений и цифр с помощью одноплатного компьютера Raspberry Pi и камеры, которые предназначены для обнаружения движений языковых жестов. Полученные изображения переводятся в текст на экране монитора с помощью специальной программы. Используемый метод заключается в обработке изображений и машинном обучении с использованием языка программирования Python и техники сверточной нейронной сети. Прототип устройства выдает предупреждение о необходимости повторить язык жестов, если перевод не удался, и удалить перевод, если он не соответствует базе данных. Прототип устройства требует дополнительных исследований для обеспечения гибкости при считывании динамических движений, выражений лиц, и перевода слов, не включенных в существующую базу данных. Также требуется расширение базы данных, отличной от языка жестов SIBI, например, BISINDO, или языков жестов из других регионов или стран.

**Ключевые слова**

CNN, глухие люди, дроид-камера, обработка изображений, машинное обучение, Python, Raspberry Pi, SIBI, язык жестов, камера смартфона, веб-камера

**Благодарности**

Работа поддержана исследовательским грантом TIER 1, H917.
Исследователи благодарят всех, кто внес свой вклад в подготовку работы, особенно в учебные программы по электротехнике и электронике UMS (Университет Мухаммадия Сураката) и по электротехнике Университета Тун Хусейн Онн Малайзия (UTHM), управление исследованиями. Благодарим Центр, который способствовал реализации и тестированию этого исследования.

**Ссылка для цитирования:** Фадлила У., Прасетьо Р.А.Р., Махамад А.К., Хандага Б., Саон Ш., Судармила Э. Моделирование базового переводчика индонезийского языка жестов на одноплатном компьютере Raspberry Pi // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2022. Т. 22, № 3. С. 574–584 (на англ. яз.). doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-3-574-584

## Introduction

Deaf people have hearing loss ranging from easy to very hard. Furthermore, deaf people have obstacles in processing language information through their hearing with or without using hearing tools. His hearing is quite successful in processing language information if the deaf person uses a hearing aid [1–7]. In fact, sign language is one of the most popular communication techniques in deaf communication [8]. At the same time, Sign Language Recognition is a breakthrough for helping deaf-mute people [9–20]. The results of the study [21] said that based on data analysis, it is known that there are still many people who do not know what sign language is and some people already know what sign language is but still do not know how to communicate with other people. Yet sign language needs to be learned to support communication between the deaf and normal people. Based on this, there must be an intermediary media to be a solution to the problem, for example, sign language translator using Raspberry Pi.

## Literature Review

Many ways have been taken to create a communication aid medium between deaf people and ordinary people, for example, by developing a prototype that translates words into sign language. The technologies such as the Python programming language, Natural Language Tool Kit, etc. had been used for developed Pakistan Sign Language (PSL) prototype [22]. The study about sign language also provides a literature review to highlight existing technology work being carried out around the world, for example, using deep learning [23–32]. Another way is to change from sign language to writing or conversation by utilizing

human gesture, especially hand gesture recognition technology and image processing [33–44]. The technology has the potential for application in sign language. But, the challenge or obstacle of this technology is achieving the accuracy of readings in various conditions, such as achieving an accurate and robust system remain, hand occlusion, transformation, database scalability, differential background illumination, position control, self-location, high computation costs, etc. [37, 45]. Meanwhile, to train the model on spatial features, usually use the inception model which is a deep Convolutional Neural Network (CNN) method to carry out basic things in bridging the communication gap in sign language recognition [23, 46–48]. By using technologies such as image processing, databases, and the Python programming language, we can create a communication aid that translates sign language into written form [22, 41]. Then, using the camera as an image sensor to extract sign language data, it is processed by the Raspberry Pi microprocessor module, and the results are displayed on the monitor screen [41, 49]. In Indonesia there are various sign languages, the main ones being Indonesian Sign Language System (SIBI) and Indonesian Sign Language (BISINDO). However, not all deaf people in Indonesia use the sign language; some prefer or are forced to communicate orally. Many other deaf people are considered linguistically isolated, living in rural areas where there is no opportunity to meet other deaf people. Meanwhile, BISINDO sign language is used in urban centers by tens and even hundreds of thousands of deaf people throughout the archipelago [36, 50–53]. However, in this project, we only take a few examples of the sign language used in SIBI (using one hand), before using BISINDO in the next project that is more flexible. The author hopes that this prototype can be a testing device for communication between the deaf and the ordinary people in their communicating using sign language, in this case SIBI method is a model in hand gestures.

## Method

The sign language used for this experiment is the SIBI method. It can be seen that the SIBI sign language movements captured by the camera will be entered into a gesture database with a certain number of movements to create a CNN movement model. The camera captures input in the form of a photo in 2 dimensions of sign language movement, then it is processed using a Python algorithm and CNN technique, so that it can classify the movements made by the user when using sign language. The model is tested using an identifier that can display the results in the form of a translation of the sign language movements captured by the camera. The sequence of how this tool works starts from taking pictures, creating a gesture database, creating a CNN model, reading the model, and displaying the results. The processed photo database is converted into a model file which is used by the main program as sign recognition data to produce the display of letters, numbers, or words on the monitor screen so that ordinary people who do not understand sign language can know the meaning of sign language hand gestures. For all of those workflows, some software and methods are required, such as Anaconda and Python programming [10]. Python is the main programming language in making sign language translation software. Background subtraction technology with calibration in translating sign language is implemented using Python programming. The details of how Python is used in this work begins with compiling scripts in Python programming to make objects or images other than the objects, or objects used to disappear in order to separate the object from the background. Data retrieval and software testing require several Python packages or libraries according to their specifications which are installed through the Anaconda Python distribution software so that the program runs more smoothly. The Background subtraction method is very influential on the change in lighting conditions of images that are processed in translation. Therefore, a calibration feature is needed to reset the processed image using frames from the previous sign language motion capture as a reference. This method can be implemented with the help of the OpenCV Package which is able to process image data captured by the camera and process the information in it [37]. In addition, machine learning methods using CNN are also explored in this project to process information data that can recognize two-dimensional objects [54]. The object is captured from hand tracking, a method where the program recognizes the hand that is in an identification area, and if the hand movement is recognized by the program, the area will follow the movement of the hand [55]. This study uses sign language as the object. Sign language is the language used by people who can't hear or are deaf. In Indonesia, there are two types of sign language, namely, BISINDO and SIBI. BISINDO, or Indonesian Sign Language, is one of the sign languages that apply in Indonesia which is natural and can be easily used in the daily interactions of the deaf. SIBI is one of the sign language systems adopted from American Sign Language (ASL). The SIBI sign language has been formalized by the government and is often used in special schools and television broadcasting in Indonesia.

There have been studies that have helped the development of sign language in Indonesia, one of which is the BISINDO community website in Surakarta [51]. Actually, the next project in this research is to build a smartphone application to translate BISINDO. Fig. 1 shows the difference between BISINDO and SIBI. SIBI uses one hand in all alphabets and in a number of sign languages while BISINDO uses not only one hand. So, maybe the level of difficulty in BISINDO tends to be higher than SIBI hand gestures. This project first uses SIBI as a sign language model before developing BISINDO application using Android smartphone in the next project.

## Results and Discussion

The sequence in data collection is in accordance with the research flow diagram in Fig. 2. The program starts by creating a photo database folder from sign language, then retrieve the database followed by basic database modeling. After that, we test the model (algorithm testing) of the hand movement whether it matches the expected sign language. If not yet, then retrieve again to photo database, but if it is suitable, immediately proceed to the next testing to read

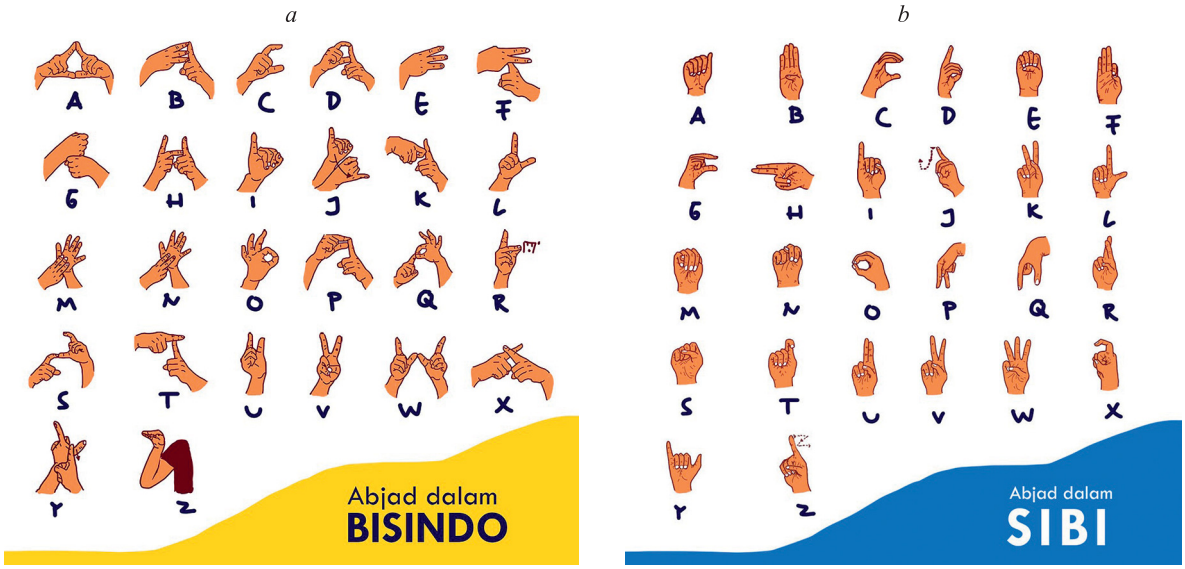



*Fig. 1*. Two types of sign language: BISINDO[1] (*a*), SIBI[2] (*b*)

[1] Available at: https://www.klobility.id/post/perbedaan-bisindo-dan-sibi (accessed: 14.02.2022).
[2] Available at: https://ekoslbkuncupmas.wordpress.com/2015/03/30/belajar-sibi/ (accessed: 14.02.2022).

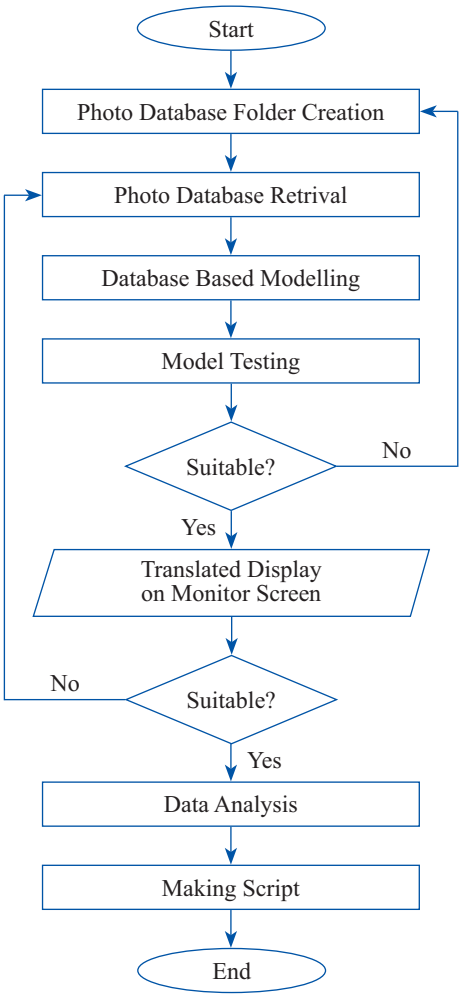



*Fig. 2*. Research flow

the sign language movement, translate it to 2D black & white frame and then match it with suitable model to get the translated language. If the translation results do not match, then look back at the hand movement model in the database. If the translation results are suitable, proceed with analyzing the data and then creating the right script to run the program repeatedly before completing the program flow until display the outcomes in text form.

In data collection and software testing, several Python packages or libraries are needed so that the program can run smoothly. The packages or libraries used are installed through the Python Anaconda distribution software. This data collection uses a sample of letters A, B, C, numbers 0, 1, 2, and the words NAMA (NAME), SAYA (I), KAMU (YOU). Each data sample is taken using two different types of cameras, namely a webcam camera installed on a laptop, and a smartphone camera using the DroidCam application (Fig. 3, *a*). This testing tool uses two cameras, namely a laptop webcam camera with 0.31 MP specifications and a resolution of 640 × 480 and a smartphone camera with 12 MP specifications and 1080 × 720 resolution and a laptop with an Intel I3 processor specification with 4 GB RAM.

The reading data on the hand signal model (having been made) is done in real time using the CNN technique which can detect and recognize objects in an image. Furthermore, it is necessary to test the final stage in collecting accuracy data, because the reading results will be used to communicate. If the reading is not accurate, it is necessary to add a database and create a new model from training data and validation data so that the accuracy increases.

In the test data from taking pictures two types of cameras used (laptop webcam and smartphone camera), like in Fig. 3, *b*. The reading results are in the form of two states: Good and Not Good. Good is a reading that produces a clear background subtraction image and no

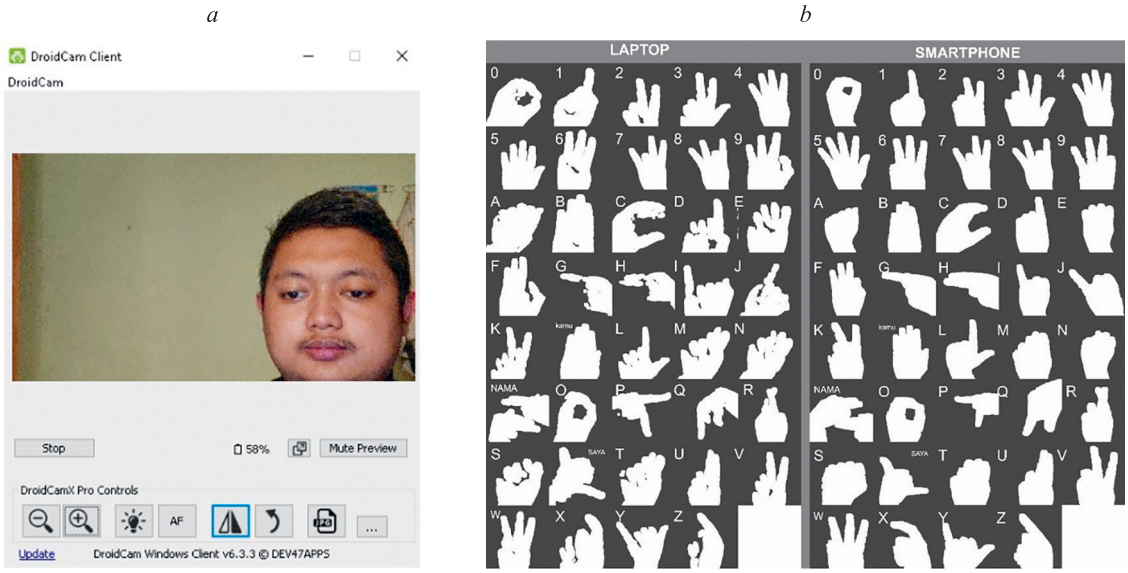



*Fig. 3*. DroidCam software (*a*); Results of the background subtraction of laptop and smartphone cameras (*b*)

pixels that obscure hand shapes, this parameter is good for database modeling and model testing. False Acceptance Rate (FAR) can be calculated as

$$FAR = \frac{The\ number\ of\ false\ acceptances}{The\ number\ of\ identification\ attempts} \times 100\ \%\ .$$

Not Good is a reading that is the opposite of a Good state. Based on the experimental data, the number of identification attempts was 78 times and the number of incorrect receipts was 33 ("Not Good"). Then the FAR value will be the value 42.3 % and the error value remains very large.

In Fig. 4, *a*, the right side shows the results of the background subtraction process using a high resolution camera that looks like the shape of a human hand in a smartphone. Meanwhile, on the left there are still many pixels that the program cannot read due to the small resolution in laptop. Therefore, for the high level of accuracy of the database model training, the authors use a smartphone camera. The 2D photo database includes data taken from the camera and directly processed using the Background subtraction method through Python programming which produces black & white photos which then stored in a folder that was created beforehand. There are two types of data taken, namely training data and validation data. Training data is the data used to create a new model, while validation data is the data used to validate data generated by machine learning training using Python algorithms that focus on code readability so that the model formed is not too biased or hyperparameter. The total number of photo data made in this study is 35,100 photos. In the training data folder, there are 600 photos; it is more than the photo data in the validation data folder containing 300 photos in total. So the total photo data in each movement includes 900 photos. The data were used for the creation of CNN training and the creation of a reading model. Meanwhile, the validation data folder is used to validate the results of the model that has been made.

In Fig. 4, *a*, a folder presents letters A–Z, numbers 0–9, and the words NAMA, SAYA, and KAMU. While Fig. 4, *b* shows the contents of the number 0 folder as an example of the contents of each photo database folder according to Table. The reading data on the hand model that has been made is done in real time and it is necessary to test the final stage of data collection for its accuracy, because the results of the reading will be used to communicate. If the reading is inaccurate, it is necessary to add databases and create new models to increase the accuracy.

Graph in Fig. 5, *b* is the result of the model training in the training data folder Database which contains photos of the results of the background subtraction of each hand

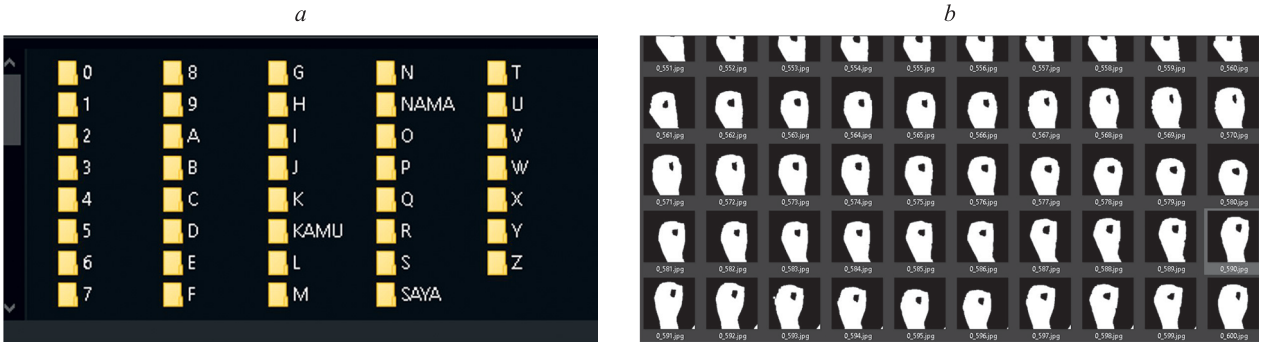



*Fig. 4*. Database folder (*a*); Database photo (*b*)

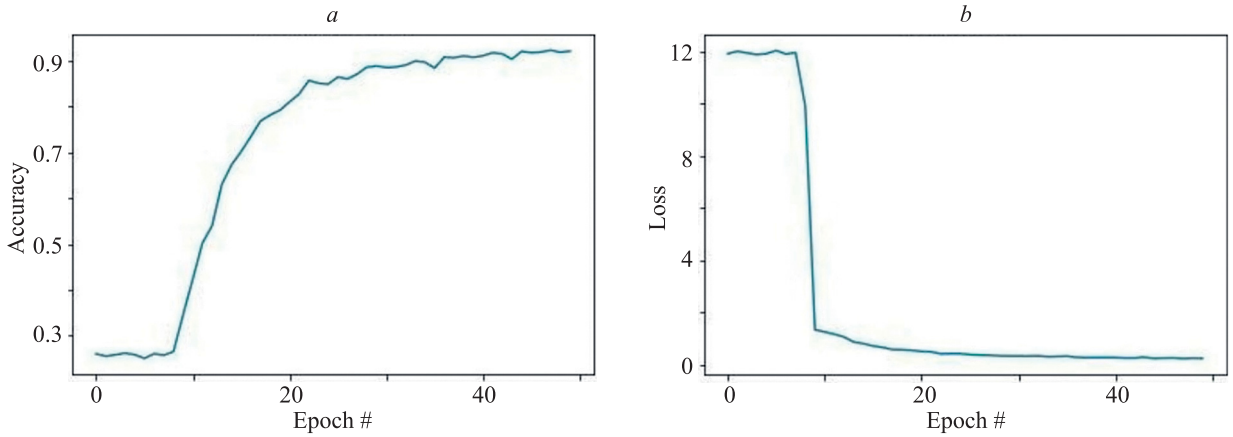



*Fig. 5*. Results of the model training: CNN Training accuracy chart (*a*), CNN Training loss (*b*)

movement totaling 600 pieces of each type of movement using CNN technique and Python programming. The validation result of the training model created by machine learning using CNN with image as input. The combination of CNN and Python programming is easier and faster in machine learning research. In this study, the value of each graph always changes as the epoch changes, in the sense that the epoch language means an event at a certain time. For example, if there are 600 images to be trained into a CNN, with a batch size of 10, it will take 10 iterations to get 1 epoch (in 1 epoch, every weights on CNN will be changed 10 times as well).

The accuracy (value and the loss value) are inversely proportional to each other: the higher the accuracy value, like in Table, the smaller the loss or loss value, like in the total accuracy percentage divided to data total:

*Table. Re*ading Accuracy Values

| Data | Author's Hand Reading Data, Times | Other People's Hand Reading Data, Times | Hand Reading Data for Deaf Disability, Times | Total Reading Error | Accuracy, % | Data | Author's Hand Reading Data, Times | Other People's Hand Reading Data Times | Hand Reading Data for Deaf Disability, Times | Total Reading Error | Accuracy, % |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **0** | 10 | 5 | 5 | 5 | 75 | **K** | 10 | 5 | 5 | 5 | 75 |
| **1** | 10 | 5 | 5 | 7 | 65 | **L** | 10 | 5 | 5 | 4 | 80 |
| **2** | 10 | 5 | 5 | 4 | 80 | **M** | 10 | 5 | 5 | 9 | 55 |
| **3** | 10 | 5 | 5 | 5 | 75 | **N** | 10 | 5 | 5 | 10 | 50 |
| **4** | 10 | 5 | 5 | 8 | 60 | **O** | 10 | 5 | 5 | 7 | 65 |
| **5** | 10 | 5 | 5 | 4 | 80 | **P** | 10 | 5 | 5 | 6 | 70 |
| **6** | 10 | 5 | 5 | 8 | 60 | **Q** | 10 | 5 | 5 | 4 | 80 |
| **7** | 10 | 5 | 5 | 8 | 60 | **R** | 10 | 5 | 5 | 5 | 75 |
| **8** | 10 | 5 | 5 | 5 | 75 | **S** | 10 | 5 | 5 | 5 | 75 |
| **9** | 10 | 5 | 5 | 4 | 80 | **T** | 10 | 5 | 5 | 9 | 55 |
| **A** | 10 | 5 | 5 | 9 | 55 | **U** | 10 | 5 | 5 | 6 | 70 |
| **B** | 10 | 5 | 5 | 9 | 55 | **V** | 10 | 5 | 5 | 6 | 70 |
| **C** | 10 | 5 | 5 | 7 | 65 | **W** | 10 | 5 | 5 | 8 | 60 |
| **D** | 10 | 5 | 5 | 5 | 75 | **X** | 10 | 5 | 5 | 6 | 70 |
| **E** | 10 | 5 | 5 | 8 | 60 | **Y** | 10 | 5 | 5 | 4 | 80 |
| **F** | 10 | 5 | 5 | 9 | 55 | **Z** | 10 | 5 | 5 | 5 | 75 |
| **G** | 10 | 5 | 5 | 4 | 80 | **NAMA** | 10 | 5 | 5 | 4 | 80 |
| **H** | 10 | 5 | 5 | 4 | 80 | **KAMU** | 10 | 5 | 5 | 7 | 65 |
| **I** | 10 | 5 | 5 | 4 | 80 | **SAYA** | 10 | 5 | 5 | 8 | 60 |
| **J** | 10 | 5 | 5 | 6 | 70 | **TOTAL** | **390** | **195** | **195** | **241** | **2695** |

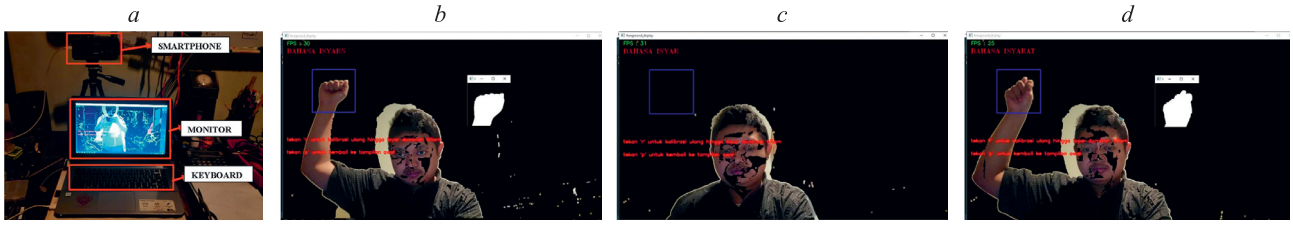



*Fig. 6*. Testing tools along with smartphone camera (*a*); read error in letter N (*b*); deletion of letter N (*c*); addition of letters A and T (*d*)

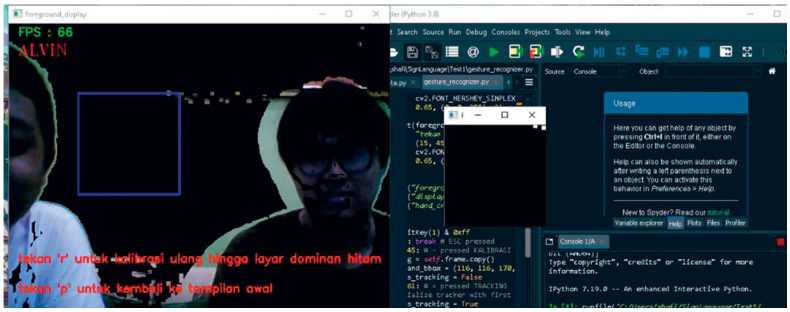



*Fig. 7*. Testing with deaf people

$$Percentage\ of\ Average\ Accuracy = \frac{\sum Reading\ data - \sum error}{\sum Reading\ data} \times 100\ \%.$$

The results of calculating the Percentage of Average Accuracy give the value 69.1 %.

When data reading is done, every program successfully recognizes and retrieves data ten times to find the accuracy of comparisons from the models that have been made from the database folder. The reading is done using one's own hands 10 times, then five times of one person and five times of one deaf person. The number of identification attempts is A + B + C is equal to 780. Thus, FRR (False Recognition Rate) can be known from

$$FRR = \frac{The\ ration\ of\ the\ number\ of\ false\ recognitions}{The\ number\ of\ identification\ attempts} \times$$

$$\times\ 100\ \% = \frac{D}{A + B + C} \times 100\ \%.$$

Calculation results for FRR give the value 30.9 %. FRR was less than FAR after testing with smartphone cameras on 3 people. So, the more data models, the lower the error rate, because the application must be trained by the data models first before launching to translate sign language hand gesture to text. In Fig. 6, *a*, the examiner is running a reading program using a smartphone camera, but it can be seen in Fig. 6, *b* that there is an error in reading the letter N which should be the letter A.

Fig. 6, *c* shows the deletion of the wrong letter, namely N. In Fig. 6, *d* it can be seen the addition of the letter A and T to complete the word "SIG". In the display window there is also an indicator of the number of Frames displayed Per Second (FPS), information on the function of the 'r' button for calibration, and information on the function of the 'p' button for returning to the initial display. There is also a small window display that is the result of the background subtraction process from reading in the blue box area. There are differences in readings that affect the level of accuracy, so added a feature to delete letters, numbers or words if there are errors in reading hand movements.

In Fig. 7, the test is carried out with the deaf that translates the sign language gestures of the letters A, L, V, I, and N that are the name of the person. The problem when working on and testing this tool is when the photo database is taken because the amount of data taken is very large, so that some of the photos taken contain noise. This is especially related to hardware specifications, the laptop being used, data retrieval and running tests with system operating conditions that are not smooth. However, the testers were able to anticipate these problems by using a laptop with a higher specification and increasing the light for clean shots. A computer should be used with minimum specification of an Intel I3 processor, 4 GB RAM, and a 12 MP camera.

## Conclusion

Based on the results of research and testing that have been carried out, the following conclusions can be drawn.

1. Before taking the photo database, we recommend to prepare a folder structure model according to the number of database types and use compatible camera. The camera specifications may affect readings even if there is an image calibration feature. The better the camera specifications, the clearer the resulting image for the database. The better the use of cameras and the number of models generated from CNN training, the better the computer specifications needed for the program to run smoothly. The computer used to run this program should have a minimum specification of an Intel I3 processor, 4GB RAM, and a 12 MP camera.
2. The modeling and reading of sign language gestures in this study were assisted by the Python programming

language using packages designed to run Image Processing, Machine Learning, and CNN. The more data models, the lower the error rate, because the application is trained with the data models first before launching.

3. This tool can read the SIBI method sign language from letters A–Z, numbers 0–9, and the words NAME, ME, YOU with different levels of accuracy, so there is a feature to delete the wrong letters, numbers, or words.

Future research should consider further the design and manufacture, so that the tool can read dynamic movements and facial expressions needed to translate words. It should use a programming language that is compatible with Android operation system or others. In addition, the design of the device should be made portable since it is easier to use and carry anywhere. The next research plan will use BISINDO because it is more dynamic, and it uses 1 and 2 hand gestures that will be captured by a smartphone camera.

**References**


1. Hernawati T. Pengembangan kemampuan berbahasa dan berbicara anak tunarungu. *Jurnal Jurusan PLB FIP Universitas Pendidikan Indonesia*, 2007, vol. 7, no. 1, pp. 101110.
2. Shiraishi Y., Zhang J., Wakatsuki D., Kumai K., Morishima A. Crowdsourced real-time captioning of sign language by deaf and hard-of-hearing people. *International Journal of Pervasive Computing and Communications*, 2017, vol. 13, no. 1, pp. 2–25. https://doi.org/10.1108/IJPCC-02-2017-0014
3. Islalm M.S., Rahman M.M., Rahman M.H., Arifuzzaman M., Sassi R., Aktaruzzaman M. Recognition bangla sign language using convolutional neural network. *Proc. of the 2019 International Conference on Innovation and Intelligence for Informatics, Computing, and Technologies (3ICT)*, 2019, pp. 8910301. https://doi.org/10.1109/3ICT.2019.8910301
4. Lim M.Y. *MySlang — An Electronic Malaysian Sign Language Dictionary*. 2008, pp. 145.
5. Karpov A., Kipyatkova I., Zelezny M. Automatic Technologies for processing spoken sign languages. *Procedia Computer Science*, 2016, vol. 81, pp. 201–207. https://doi.org/10.1016/j.procs.2016.04.050
6. Brour M., Benabbou A. ATLASLang NMT: Arabic text language into Arabic sign language neural machine translation. *Journal of King Saud University — Computer and Information Sciences*, 2019, vol. 33, no. 9, pp. 1121–1131. https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2019.07.006
7. Latif G., Mohammad N., Alghazo J., AlKhalaf R., AlKhalaf R. ArASL: Arabic alphabets sign language dataset. *Data in Brief*, 2019, vol. 23, pp. 103777. https://doi.org/10.1016/j.dib.2019.103777
8. Suharjito S., Thiracitta N., Gunawan H., Witjaksono G. The comparison of some hidden Markov models for sign language recognition. *Proc. of the 1st Indonesian Association for Pattern Recognition International Conference (INAPR)*, 2019, pp. 6–10. https://doi.org/10.1109/INAPR.2018.8627031
9. Muthu Mariappan H., Gomathi V. Real-time recognition of Indian sign language. *Proc. of the 2nd International Conference on Computational Intelligence in Data Science (ICCIDS)*, 2019, pp. 8862125. https://doi.org/10.1109/ICCIDS.2019.8862125
10. Kadiyala A., Kumar A. Applications of Python to evaluate environmental data science problems. *Environmental Progress and Sustainable Energy*, 2017, vol. 36, no. 6, pp. 1580–1586. https://doi.org/10.1002/ep.12786
11. Xie M., Ma X. End-to-End residual neural network with data augmentation for sign language recognition. *Proc. of the 4th IEEE Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC)*, 2019, pp. 1629–1633. https://doi.org/10.1109/IAEAC47372.2019.8998073
12. Inoue K., Shiraishi T., Yoshioka M., Yanagimoto H. Depth sensor based automatic hand region extraction by using time-series curve and its application to Japanese finger-spelled sign language recognition. *Procedia Computer Science*, 2015, vol. 60, no. 1, pp. 371–380. https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.08.145
13. Xue Y., Gao S., Sun H., Qin W. A Chinese sign language recognition system using leap motion. *Proc. of the 7th International Conference on Virtual Reality and Visualization (ICVRV)*, 2017, pp. 180–185. https://doi.org/10.1109/ICVRV.2017.00044
14. Kumar E.K., Kishore P.V.V., Kiran Kumar M.T., Kumar D.A. 3D sign language recognition with joint distance and angular coded color topographical descriptor on a 2 — stream CNN. *Neurocomputing*, 2020, vol. 372, pp. 40–54. https://doi.org/10.1016/j.neucom.2019.09.059


**Литература**


1. Hernawati T. Pengembangan kemampuan berbahasa dan berbicara anak tunarungu // Jurnal Jurusan PLB FIP Universitas Pendidikan Indonesia. 2007. V. 7. N 1. P. 101110.
2. Shiraishi Y., Zhang J., Wakatsuki D., Kumai K., Morishima A. Crowdsourced real-time captioning of sign language by deaf and hard-of-hearing people // International Journal of Pervasive Computing and Communications. 2017. V. 13. N 1. P. 2–25. https://doi.org/10.1108/IJPCC-02-2017-0014
3. Islalm M.S., Rahman M.M., Rahman M.H., Arifuzzaman M., Sassi R., Aktaruzzaman M. Recognition bangla sign language using convolutional neural network // Proc. of the 2019 International Conference on Innovation and Intelligence for Informatics, Computing, and Technologies (3ICT). 2019. P. 8910301. https://doi.org/10.1109/3ICT.2019.8910301
4. Lim M.Y. MySlang — An Electronic Malaysian Sign Language Dictionary. 2008. p. 145.
5. Karpov A., Kipyatkova I., Zelezny M. Automatic Technologies for processing spoken sign languages // Procedia Computer Science. 2016. V. 81. P. 201–207. https://doi.org/10.1016/j.procs.2016.04.050
6. Brour M., Benabbou A. ATLASLang NMT: Arabic text language into Arabic sign language neural machine translation // Journal of King Saud University — Computer and Information Sciences. 2019. V. 33. N 9. P. 1121–1131. https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2019.07.006
7. Latif G., Mohammad N., Alghazo J., AlKhalaf R., AlKhalaf R. ArASL: Arabic alphabets sign language dataset // Data in Brief. 2019. V. 23. P. 103777. https://doi.org/10.1016/j.dib.2019.103777
8. Suharjito S., Thiracitta N., Gunawan H., Witjaksono G. The comparison of some hidden Markov models for sign language recognition // Proc. of the 1st Indonesian Association for Pattern Recognition International Conference (INAPR). 2019. P. 6–10. https://doi.org/10.1109/INAPR.2018.8627031
9. Muthu Mariappan H., Gomathi V. Real-time recognition of Indian sign language // Proc. of the 2nd International Conference on Computational Intelligence in Data Science (ICCIDS). 2019. P. 8862125. https://doi.org/10.1109/ICCIDS.2019.8862125
10. Kadiyala A., Kumar A. Applications of Python to evaluate environmental data science problems // Environmental Progress and Sustainable Energy. 2017. V. 36. N 6. P. 1580–1586. https://doi.org/10.1002/ep.12786
11. Xie M., Ma X. End-to-End residual neural network with data augmentation for sign language recognition // Proc. of the 4th IEEE Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC). 2019. P. 1629–1633. https://doi.org/10.1109/IAEAC47372.2019.8998073
12. Inoue K., Shiraishi T., Yoshioka M., Yanagimoto H. Depth sensor based automatic hand region extraction by using time-series curve and its application to Japanese finger-spelled sign language recognition // Procedia Computer Science. 2015. V. 60. N 1. P. 371–380. https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.08.145
13. Xue Y., Gao S., Sun H., Qin W. A Chinese sign language recognition system using leap motion // Proc. of the 7th International Conference on Virtual Reality and Visualization (ICVRV). 2017. P. 180–185. https://doi.org/10.1109/ICVRV.2017.00044
14. Kumar E.K., Kishore P.V.V., Kiran Kumar M.T., Kumar D.A. 3D sign language recognition with joint distance and angular coded color topographical descriptor on a 2 — stream CNN // Neurocomputing. 2020. V. 372. P. 40–54. https://doi.org/10.1016/j.neucom.2019.09.059
15. Yang X., Chen X., Cao X., Wei S., Zhang X. Chinese sign language recognition based on an optimized tree-structure framework // IEEE

15. Yang X., Chen X., Cao X., Wei S., Zhang X. Chinese sign language recognition based on an optimized tree-structure framework. *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, 2017, vol. 21, no. 4, pp. 994–1004. https://doi.org/10.1109/JBHI.2016.2560907
16. Rincon Vega A.M., Vasquez A., Amador W., Rojas A. Deep learning for the recognition of facial expression in the Colombian sign language. *Annals of Physical and Rehabilitation Medicine*, 2018, vol. 61, pp. e96. https://doi.org/10.1016/j.rehab.2018.05.204
17. Joy J., Balakrishnan K., Sreeraj M. SignQuiz: A quiz based tool for learning fingerspelled signs in indian sign language using ASLR. *IEEE Access*, 2019, vol. 7, pp. 28363–28371. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2901863
18. Gupta B., Shukla P., Mittal A. K-nearest correlated neighbor classification for Indian sign language gesture recognition using feature fusion. *Proc. of the 6th International Conference on Computer Communication and Informatics (ICCCI)*, 2016, pp. 7479951. https://doi.org/10.1109/ICCCI.2016.7479951
19. Singh S. Sign language to text by feed forward back propagation neural network. *International Journal of Advanced Research in Computer Science*, 2012, vol. 3, no. 3, pp. 146–152. https://doi.org/10.26483/ijarcs.v3i3.1209
20. Abid M.R., Petriu E.M., Amjadian E. Dynamic sign language recognition for smart home interactive application using stochastic linear formal grammar. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2015, vol. 64, no. 3, pp. 596–605. https://doi.org/10.1109/TIM.2014.2351331
21. Bayu Ramadhani Fajri B., Ramadhani Fajri B., Kusumastuti G. Perceptions of 'hearing' people on sign language learning. *Advances in Social Science, Education and Humanities Research*, 2019, vol. 382, pp. 364–367. https://doi.org/10.2991/icet-19.2019.91
22. Abbas A., Sarfraz S. Developing a prototype to translate text and speech to Pakistan sign language with bilingual subtitles: A framework. *Journal of Educational Technology Systems*, 2018, vol. 47, no. 2, pp. 248–266. https://doi.org/10.1177/0047239518794168
23. Tao W., Leu M.C., Yin Z. American Sign Language alphabet recognition using Convolutional Neural Networks with multiview augmentation and inference fusion. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2018, vol. 76, pp. 202–213. https://doi.org/10.1016/j.engappai.2018.09.006
24. Sudharshan D.P., Raj S. Object recognition in images using convolutional neural network. *Proc. of the 2nd International Conference on Inventive Systems and Control (ICISC)*, 2018, pp. 718–821. https://doi.org/10.1109/ICISC.2018.8398893
25. Hernández-Blanco A., Herrera-Flores B., Tomás D., Navarro-Colorado B. A Systematic review of deep learning approaches to educational data mining. *Complexity*, 2019, vol. 2019, pp. 1306039. https://doi.org/10.1155/2019/1306039
26. Zhang Q., Zhang M., Chen T., Sun Z., Ma Y., Yu B. Recent advances in convolutional neural network acceleration. *Neurocomputing*, 2019, vol. 323, pp. 37–51. https://doi.org/10.1016/j.neucom.2018.09.038
27. Bantupalli K., Xie Y. American sign language recognition using deep learning and computer vision. *Proc. of the 2018 IEEE International Conference on Big Data*, 2018, pp. 4896–4899. https://doi.org/10.1109/BigData.2018.8622141
28. Liao Y., Xiong P., Min W., Min W., Lu J. Dynamic sign language recognition based on video sequence with BLSTM-3D residual networks. *IEEE Access*, 2019, vol. 7, pp. 38044–38054. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2904749
29. Nasreddine K., Benzinou A. Shape geodesics for robust sign language recognition. *IET Image Process*, 2019, vol. 13, no. 5, pp. 825–832. https://doi.org/10.1049/iet-ipr.2018.5282
30. Tolentino L.K.S., Serfa Juan R.O., Thio-ac A.C., Pamahoy M.A.B., Forteza J.R.R., Garcia X.J.O. Static sign language recognition using deep learning. *International Journal of Machine Learning and Computing*, 2019, vol. 9, no. 6, pp. 821–827. https://doi.org/10.18178/ijmlc.2019.9.6.879
31. Sreedevi J., Rama Bai M., Ahmed M.M. An approach to translate hand gestures into telugu text. *International Journal of Scientific and Technology Research*, 2020, vol. 9, no. 4, pp. 258–264.
32. Azar S.G., Seyedarabi H. Trajectory-based recognition of dynamic Persian sign language using hidden Markov model. *Computer Speech and Language*, 2020, vol. 61, pp. 101053. https://doi.org/10.1016/j.csl.2019.101053
33. Rajam P.S., Balakrishnan G. Recognition of Tamil sign language alphabet using image processing to aid deaf-dumb people. *Procedia Engineering*. 2012. V. 30. P. 861–868. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.01.938

Journal of Biomedical and Health Informatics. 2017. V. 21. N 4. P. 994–1004. https://doi.org/10.1109/JBHI.2016.2560907
16. Rincon Vega A.M., Vasquez A., Amador W., Rojas A. Deep learning for the recognition of facial expression in the Colombian sign language // Annals of Physical and Rehabilitation Medicine. 2018. V. 61. p. e96. https://doi.org/10.1016/j.rehab.2018.05.204
17. Joy J., Balakrishnan K., Sreeraj M. SignQuiz: A quiz based tool for learning fingerspelled signs in indian sign language using ASLR // IEEE Access. 2019. V. 7. P. 28363–28371. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2901863
18. Gupta B., Shukla P., Mittal A. K-nearest correlated neighbor classification for Indian sign language gesture recognition using feature fusion // Proc. of the 6th International Conference on Computer Communication and Informatics (ICCCI). 2016. P. 7479951. https://doi.org/10.1109/ICCCI.2016.7479951
19. Singh S. Sign language to text by feed forward back propagation neural network // International Journal of Advanced Research in Computer Science. 2012. V. 3. N 3. P. 146–152. https://doi.org/10.26483/ijarcs.v3i3.1209
20. Abid M.R., Petriu E.M., Amjadian E. Dynamic sign language recognition for smart home interactive application using stochastic linear formal grammar // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2015. V. 64. N 3. P. 596–605. https://doi.org/10.1109/TIM.2014.2351331
21. Bayu Ramadhani Fajri B., Ramadhani Fajri B., Kusumastuti G. Perceptions of 'hearing' people on sign language learning // Advances in Social Science, Education and Humanities Research. 2019. V. 382. P. 364–367. https://doi.org/10.2991/icet-19.2019.91
22. Abbas A., Sarfraz S. Developing a prototype to translate text and speech to Pakistan sign language with bilingual subtitles: A framework // Journal of Educational Technology Systems. 2018. V. 47. N 2. P. 248–266. https://doi.org/10.1177/0047239518794168
23. Tao W., Leu M.C., Yin Z. American Sign Language alphabet recognition using Convolutional Neural Networks with multiview augmentation and inference fusion // Engineering Applications of Artificial Intelligence. 2018. V. 76. P. 202–213. https://doi.org/10.1016/j.engappai.2018.09.006
24. Sudharshan D.P., Raj S. Object recognition in images using convolutional neural network // Proc. of the 2nd International Conference on Inventive Systems and Control (ICISC). 2018. P. 718–821. https://doi.org/10.1109/ICISC.2018.8398893
25. Hernández-Blanco A., Herrera-Flores B., Tomás D., Navarro-Colorado B. A Systematic review of deep learning approaches to educational data mining // Complexity. 2019. V. 2019. P. 1306039. https://doi.org/10.1155/2019/1306039
26. Zhang Q., Zhang M., Chen T., Sun Z., Ma Y., Yu B. Recent advances in convolutional neural network acceleration // Neurocomputing. 2019. V. 323. P. 37–51. https://doi.org/10.1016/j.neucom.2018.09.038
27. Bantupalli K., Xie Y. American sign language recognition using deep learning and computer vision // Proc. of the 2018 IEEE International Conference on Big Data. 2018. P. 4896–4899. https://doi.org/10.1109/BigData.2018.8622141
28. Liao Y., Xiong P., Min W., Min W., Lu J. Dynamic sign language recognition based on video sequence with BLSTM-3D residual networks // IEEE Access. 2019. V. 7. P. 38044–38054. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2904749
29. Nasreddine K., Benzinou A. Shape geodesics for robust sign language recognition // IET Image Process. 2019. V. 13. N 5. P. 825–832. https://doi.org/10.1049/iet-ipr.2018.5282
30. Tolentino L.K.S., Serfa Juan R.O., Thio-ac A.C., Pamahoy M.A.B., Forteza J.R.R., Garcia X.J.O. Static sign language recognition using deep learning // International Journal of Machine Learning and Computing. 2019. V. 9. N 6. P. 821–827. https://doi.org/10.18178/ijmlc.2019.9.6.879
31. Sreedevi J., Rama Bai M., Ahmed M.M. An approach to translate hand gestures into telugu text // International Journal of Scientific and Technology Research. 2020. V. 9. N 4. P. 258–264.
32. Azar S.G., Seyedarabi H. Trajectory-based recognition of dynamic Persian sign language using hidden Markov model // Computer Speech and Language. 2020. V. 61. P. 101053. https://doi.org/10.1016/j.csl.2019.101053
33. Rajam P.S., Balakrishnan G. Recognition of Tamil sign language alphabet using image processing to aid deaf-dumb people // Procedia Engineering. 2012. V. 30. P. 861–868. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.01.938

*Engineering*, 2012, vol. 30, pp. 861–868. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.01.938
34. Tan T.S., Salleh S.H., Ariff A.K., Ting C.M., Siew K.S., Leong S.H. Malay sign language gesture recognition system. *Proc. of the 2007 International Conference on Intelligent and Advanced Systems (ICIAS)*, 2007, pp. 982–985. https://doi.org/10.1109/ICIAS.2007.4658532
35. Gulhane V.M., Joshi M.S., Ingole M.D. Neural network based hand gesture recognition. *International Journal of Advanced Research in Computer Science*, 2012, vol. 3, no. 3, pp. 849–853. https://doi.org/10.26483/ijarcs.v3i3.1244
36. Indra D., Purnawansyah S., Madenda S., Wibowo E.P. Indonesian sign language recognition based on shape of hand gesture. *Procedia Computer Science*, 2019, vol. 161, pp. 74–81. https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.11.101
37. Cheok M.J., Omar Z., Jaward M.H. A review of hand gesture and sign language recognition techniques. *International Journal of Machine Learning and Cybernetics*, 2019, vol. 10, no. 1, pp. 131–153. https://doi.org/10.1007/s13042-017-0705-5
38. Tewari D., Srivastava S.K. A visual recognition of static hand gestures in Indian sign language based on kohonen self-organizing map algorithm. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, 2012, no. 2, pp. 165–170.
39. Rajaganapathy S., Aravind B., Keerthana B., Sivagami M. Conversation of sign language to speech with human gestures. *Procedia Computer Science*, 2015, vol. 50, pp. 10–15. https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.04.004
40. Chen Y., Zhang W. Research and implementation of sign language recognition method based on Kinect. *Proc. of the 2nd International Conference on Computer and Communications (ICCC)*, 2016, pp. 1947–1951. https://doi.org/10.1109/CompComm.2016.7925041
41. Abed A.A., Rahman S.A. Python-based Raspberry Pi for hand gesture recognition. *International Journal of Computer Applications*, 2017, vol. 173, no. 4, pp. 18–24. https://doi.org/10.5120/ijca2017915285
42. Suharjito, Ariesta M.C., Wiryana F., Kusuma G.P. A survey of hand gesture recognition methods in sign language recognition. *Pertanika Journal of Science and Technology*, 2018, vol. 26, no. 4, pp. 1659–1675.
43. Asadi-Aghbolaghi M., Clapés A., Bellantonio M., Escalante H., Ponce-López V., Baró X., Guyon I., Kasaei S., Escalera S. Deep learning for action and gesture recognition in image sequences: A survey. *Gesture Recognition. Springer*, 2017, pp. 539–578. https://doi.org/10.1007/978-3-319-57021-1_19
44. Manikandan K., Patidar A., Walia P., Roy A.B. Hand gesture detection and conversion to speech and text. *arXiv*, 2018, arXiv:1811.11997. https://doi.org/10.48550/arXiv.1811.11997
45. Cañas J.M., Martín-Martín D., Arias P., Vega J., Roldán-álvarez D., García-Pérez I., Fernández-Conde J. Open-source drone programming course for distance engineering education. *Electronics*, 2020, vol. 9, no. 12, pp. 1–18. https://doi.org/10.3390/electronics9122163
46. Masood S., Srivastava A., Thuwal H.C., Ahmad M. Real-time sign language gesture (word) recognition from video sequences using CNN and RNN. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2018, vol. 695, pp. 623–632. https://doi.org/10.1007/978-981-10-7566-7_63
47. Islam M.S., Mousumi S.S.S., Azad Rabby A.K.M.S., Hossain S.A., Abujar S. A potent model to recognize bangla sign language digits using convolutional neural network. *Procedia Computer Science*, 2018, vol. 143, pp. 611–618. https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.10.438
48. Zhong B., Xing X., Love P., Wang X., Luo H. Convolutional neural network: Deep learning-based classification of building quality problems. *Advanced Engineering Informatics*, 2019, vol. 40, pp. 46–57. https://doi.org/10.1016/j.aei.2019.02.009
49. Dawane S.P., Sayyed H.G.A. Hand gesture recognition for deaf and dumb people using GSM module. *International Journal of Science and Research*, 2017, vol. 6, no. 5, pp. 2226–2230.
50. Handhika T., Zen R.I.M., Murni, Lestari D.P., Sari I. Gesture recognition for Indonesian Sign Language (BISINDO). *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, vol. 1028, no. 1, pp. 012173. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1028/1/012173
51. Fadlilah U., Wismoyohadi D., Mahamad A.K., Handaga B. Bisindo information system as potential daily sign language learning. *AIP Conference Proceedings*, 2019, vol. 2114, pp. 060021. https://doi.org/10.1063/1.5112492

34. Tan T.S., Salleh S.H., Ariff A.K., Ting C.M., Siew K.S., Leong S.H. Malay sign language gesture recognition system // Proc. of the 2007 International Conference on Intelligent and Advanced Systems (ICIAS). 2007. P. 982–985. https://doi.org/10.1109/ICIAS.2007.4658532
35. Gulhane V.M., Joshi M.S., Ingole M.D. Neural network based hand gesture recognition // International Journal of Advanced Research in Computer Science. 2012. V. 3. N 3. P. 849–853. https://doi.org/10.26483/ijarcs.v3i3.1244
36. Indra D., Purnawansyah S., Madenda S., Wibowo E.P. Indonesian sign language recognition based on shape of hand gesture // Procedia Computer Science. 2019. V. 161. P. 74–81. https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.11.101
37. Cheok M.J., Omar Z., Jaward M.H. A review of hand gesture and sign language recognition techniques // International Journal of Machine Learning and Cybernetics. 2019. V. 10. N 1. P. 131–153. https://doi.org/10.1007/s13042-017-0705-5
38. Tewari D., Srivastava S.K. A visual recognition of static hand gestures in Indian sign language based on kohonen self-organizing map algorithm // International Journal of Engineering and Advanced Technology. 2012. N 2. P. 165–170.
39. Rajaganapathy S., Aravind B., Keerthana B., Sivagami M. Conversation of sign language to speech with human gestures // Procedia Computer Science. 2015. V. 50. P. 10–15. https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.04.004
40. Chen Y., Zhang W. Research and implementation of sign language recognition method based on kinect // Proc. of the 2nd International Conference on Computer and Communications (ICCC). 2016. P. 1947–1951. https://doi.org/10.1109/CompComm.2016.7925041
41. Abed A.A., Rahman S.A. Python-based Raspberry Pi for hand gesture recognition // International Journal of Computer Applications. 2017. V. 173. N 4. P. 18–24. https://doi.org/10.5120/ijca2017915285
42. Suharjito, Ariesta M.C., Wiryana F., Kusuma G.P. A survey of hand gesture recognition methods in sign language recognition // Pertanika Journal of Science and Technology. 2018. V. 26. N 4. P. 1659–1675.
43. Asadi-Aghbolaghi M., Clapés A., Bellantonio M., Escalante H., Ponce-López V., Baró X., Guyon I., Kasaei S., Escalera S. Deep learning for action and gesture recognition in image sequences: A survey // Gesture Recognition. Springer, 2017. P. 539–578. https://doi.org/10.1007/978-3-319-57021-1_19
44. Manikandan K., Patidar A., Walia P., Roy A.B. Hand gesture detection and conversion to speech and text // arXiv. 2018. arXiv:1811.11997. https://doi.org/10.48550/arXiv.1811.11997
45. Cañas J.M., Martín-Martín D., Arias P., Vega J., Roldán-álvarez D., García-Pérez I., Fernández-Conde J. Open-source drone programming course for distance engineering education // Electronics. 2020. V. 9. N 12. P. 1–18. https://doi.org/10.3390/electronics9122163
46. Masood S., Srivastava A., Thuwal H.C., Ahmad M. Real-time sign language gesture (word) recognition from video sequences using CNN and RNN // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2018. V. 695. P. 623–632. https://doi.org/10.1007/978-981-10-7566-7_63
47. Islam M.S., Mousumi S.S.S., Azad Rabby A.K.M.S., Hossain S.A., Abujar S. A potent model to recognize bangla sign language digits using convolutional neural network // Procedia Computer Science. 2018. V. 143. P. 611–618. https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.10.438
48. Zhong B., Xing X., Love P., Wang X., Luo H. Convolutional neural network: Deep learning-based classification of building quality problems // Advanced Engineering Informatics. 2019. V. 40. P. 46–57. https://doi.org/10.1016/j.aei.2019.02.009
49. Dawane S.P., Sayyed H.G.A. Hand gesture recognition for deaf and dumb people using GSM module // International Journal of Science and Research. 2017. V. 6. N 5. P. 2226–2230.
50. Handhika T., Zen R.I.M., Murni, Lestari D.P., Sari I. Gesture recognition for Indonesian Sign Language (BISINDO) // Journal of Physics: Conference Series. 2018. V. 1028. N 1. P. 012173. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1028/1/012173
51. Fadlilah U., Wismoyohadi D., Mahamad A.K., Handaga B. Bisindo information system as potential daily sign language learning // AIP Conference Proceedings. 2019. V. 2114. P. 060021. https://doi.org/10.1063/1.5112492

52. Palfreyman N. Social meanings of linguistic variation in BISINDO (Indonesian sign language) // Asia-Pacific Language Variation. 2020. V. 6. N 1. P. 89–118. https://doi.org/10.1075/aplv.00008.pal
53. Fadlilah U., Mahamad A.K., Handaga B. The Development of android for Indonesian sign language using tensorflow lite and CNN: An

52. Palfreyman N. Social meanings of linguistic variation in BISINDO (Indonesian sign language). *Asia-Pacific Language Variation*, 2020, vol. 6, no. 1, pp. 89–118. https://doi.org/10.1075/aplv.00008.pal
53. Fadlilah U., Mahamad A.K., Handaga B. The Development of android for Indonesian sign language using tensorflow lite and CNN: An initial study. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, vol. 1858, no. 1, pp. 012085. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1858/1/012085
54. Dewa C.K., Fadhilah A.L., Afiahayati A. Convolutional neural networks for handwritten Javanese character recognition. *IJCCS (Indonesian Journal of Computing and Cybernetics Systems)*, 2018, vol. 12, no 1, pp. 83. https://doi.org/10.22146/ijccs.31144
55. Kurien M., Kim M.K., Kopsida M., Brilakis I. Real-time simulation of construction workers using combined human body and hand tracking for robotic construction worker system. *Automation in Construction*, 2018, vol. 86, pp. 125–137. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.11.005

initial study // Journal of Physics: Conference Series. 2021. V. 1858. N 1. P. 012085. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1858/1/012085
54. Dewa C.K., Fadhilah A.L., Afiahayati A. Convolutional neural networks for handwritten Javanese character recognition // IJCCS (Indonesian Journal of Computing and Cybernetics Systems). 2018. V. 12. N 1. p. 83. https://doi.org/10.22146/ijccs.31144
55. Kurien M., Kim M.K., Kopsida M., Brilakis I. Real-time simulation of construction workers using combined human body and hand tracking for robotic construction worker system // Automation in Construction. 2018. V. 86. P. 125–137. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.11.005

## Authors

**Umi Fadlilah** — M. Eng., Lecturer, Universitas Muhammadiyah Surakarta, Surakarta, 57169, Indonesia; Student, Universiti Tun Hussein Onn Malaysia, Batu Pahat, Johor, 86400, Malaysia, SC 57202821436, https://orcid.org/0000-0002-2261-3663, uf138@ums.ac.id

**Raden A.R. Prasetyo** — Bach. of Elec. Eng., Alumni, Universitas Muhammadiyah Surakarta, Surakarta, 57169, Indonesia, https://orcid.org/0000-0001-8747-9437, adrian.raflip@gmail.com
**Abd K. Mahamad** — D. Sc., Associate Professor, Universiti Tun Hussein Onn Malaysia, Batu Pahat, Johor, 86400, Malaysia, SC 26423181700, https://orcid.org/0000-0002-3985-6549, kadir@uthm.edu.my

**Bana Handaga** — PhD, Lecturer, Universitas Muhammadiyah Surakarta, Surakarta, 57169, Indonesia, SC 43061222800, https://orcid.org/0000-0001-6797-6233, bana.handaga@ums.ac.id
**Sharifah Saon** — M. of Elec. Eng., Senior Lecturer, Universiti Tun Hussein Onn Malaysia, Batu Pahat, Johor, 86400, Malaysia, SC 35280559600, https://orcid.org/0000-0003-2706-3258, sharifa@uthm.edu.my
**Endah Sudarmilah** — D. Sc., Researcher, Senior Lecturer, Universitas Muhammadiyah Surakarta, Surakarta, 57169, Indonesia, SC 56122440200, https://orcid.org/0000-0002-9244-4762, Endah.Sudarmilah@ums.ac.id

## Авторы

**Фадлила Уми** — магистр, преподаватель, Университет Мухаммадия Сураката, Сураката, 57169, Индонезия; студент, Университет Тун Хусейн Онн Малайзия, Бату Пахат, Джохор, 86400, Малайзия, SC 57202821436, https://orcid.org/0000-0002-2261-3663, uf138@ums.ac.id
**Прасетьо Раден Адриан Рафли** — бакалавр, выпускник, Университет Мухаммадия Сураката, Сураката, 57169, Индонезия, https://orcid.org/0000-0001-8747-9437, adrian.raflip@gmail.com
**Махамад Абд Кадир** — доктор наук, доцент, Университет Тун Хусейн Онн Малайзия, Бату Пахат, Джохор, 86400, Малайзия, SC 26423181700, https://orcid.org/0000-0002-3985-6549, kadir@uthm.edu.my
**Хандага Бана** — PhD, преподаватель, Университет Мухаммадия Сураката, Сураката, 57169, Индонезия, SC 43061222800, https://orcid.org/0000-0001-6797-6233, bana.handaga@ums.ac.id
**Саон Шарифа** — магистр, старший преподаватель, Университет Тун Хусейн Онн Малайзия, Бату Пахат, Джохор, 86400, Малайзия, SC 35280559600, https://orcid.org/0000-0003-2706-3258, sharifa@uthm.edu.my
**Судармила Энда** — доктор наук, исследователь, старший преподаватель, Университет Мухаммадия Сураката, Сураката, 57169, Индонезия, SC 56122440200, https://orcid.org/0000-0002-9244-4762, Endah.Sudarmilah@ums.ac.id

*Received 10.03.2022*
*Approved after reviewing 08.04.2022*
*Accepted 19.05.2022*

*Статья поступила в редакцию 10.03.2022*
*Одобрена после рецензирования 08.04.2022*
*Принята к печати 19.05.2022*

Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ
май–июнь 2022 Том 22 № 3 http://ntv.ifmo.ru/
SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL OF INFORMATION TECHNOLOGIES, MECHANICS AND OPTICS
May–June 2022 Vol. 22 No 3 http://ntv.ifmo.ru/en/
ISSN 2226-1494 (print) ISSN 2500-0373 (online)

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК УНИВЕРСИТЕТ ИТМО
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ

doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-3-585-593
УДК 004.855.5

# Метод многомодального машинного сурдоперевода для естественного человеко-машинного взаимодействия

**Александр Александрович Аксёнов[1]✉, Ильдар Амирович Кагиров[2], Дмитрий Александрович Рюмин[3]**

[1,2,3] Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук, Санкт-Петербург, 199178, Российская Федерация

[1] axyonov.a@iias.spb.su✉, https://orcid.org/0000-0002-7479-2851
[2] kagirov@iias.spb.su, https://orcid.org/0000-0003-1196-1117
[3] ryumin.d@iias.spb.su, https://orcid.org/0000-0002-7935-0569

**Аннотация**

**Предмет исследования.** Исследована возможность повышения надежности автоматической системы распознавания как отдельных жестов, так и жестового языка, за счет использования наиболее информативных пространственно-временных визуальных признаков. **Метод.** Представленный метод автоматического распознавания жестовой информации основан на интегральной нейросетевой модели, которая анализирует пространственно-временные визуальные признаки: 2D и 3D расстояния от лица до руки; площадь пересечения лица и руки; конфигурацию руки; гендерную и возрастную информацию о дикторе. Для извлечения информации о конфигурации руки разработана нейросетевая модель на основе архитектуры 3DResNet-18 для получения гендерной и возрастной информации. В метод встроены нейросетевые модели из программной платформы Deepface. **Основные результаты.** Предложенный метод апробирован на данных многомодального корпуса элементов жестового языка TheRuSLan, результаты которого достигают точности распознавания жестов 91,14 %. **Практическая значимость.** Результаты исследования позволяют повысить точность и робастность не только машинного сурдоперевода, но и естественность человеко-машинного взаимодействия в целом. Полученные результаты могут найти применение в сферах социального обслуживания медицины и образования, в робототехнике и в центрах обслуживания населения.

**Ключевые слова**

язык тела, жестикуляция, машинный сурдоперевод, естественность коммуникации

**Благодарности**

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-71-00141, https://rscf.ru/project/21-71-00141/

**Ссылка для цитирования:** Аксёнов А.А., Кагиров И.А., Рюмин Д.А. Метод многомодального машинного сурдоперевода для естественного человеко-машинного взаимодействия // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2022. Т. 22, № 3. С. 585–593. doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-3-585-593

# A method of multimodal machine sign language translation for natural human-computer interaction

**Alexandr A. Axyonov[1]✉, Ildar A. Kagirov[2], Dmitry A. Ryumin[3]**

[1,2,3] Saint Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS), Saint Petersburg, 199178, Russian Federation

[1] axyonov.a@iias.spb.su✉, https://orcid.org/0000-0002-7479-2851
[2] kagirov@iias.spb.su, https://orcid.org/0000-0003-1196-1117
[3] ryumin.d@iias.spb.su, https://orcid.org/0000-0002-7935-0569

© Аксёнов А.А., Кагиров И.А., Рюмин Д.А., 2022

**Abstract**
This paper aims to investigate the possibility of robustness enhancement as applied to an automatic system for isolated signs and sign languages recognition, through the use of the most informative spatiotemporal visual features. The authors present a method for the automatic recognition of gestural information, based on an integrated neural network model, which analyses spatiotemporal visual features: 2D and 3D distances between the palm and the face; the area of the hand and the face intersection; hand configuration; the gender and the age of signers. A 3DResNet-18-based neural network model for hand configuration data extraction was elaborated. Deepface software platform neural network models were embedded in the method in order to extract gender and age-related data. The proposed method was tested on the data from the multimodal corpus of sign language elements TheRuSLan, with the accuracy of 91.14 %. The results of this investigation not only improve the accuracy and robustness of machine sign language translation, but also enhance the naturalness of human-machine interaction in general. Besides that, the results have application in various fields of social services, medicine, education and robotics, as well as different public service centers.

**Keywords**
body language, gesticulation, machine sign language translation, naturalness of a communication medium

**Acknowledgements**
This research is financially supported by the Russian Science Foundation (No. 21-71-00141, https://rscf.ru/en/project/21-71-00141/)

**For citation:** Axyonov A.A., Kagirov I.A., Ryumin D.A. A method of multimodal machine sign language translation for natural human-computer interaction. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2022, vol. 22, no. 3, pp. 585–593 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-3-585-593

## Введение

Известно, что инвалиды по слуху ограничены в возможностях при общении со слышащими людьми, а при обращении в различные государственные учреждения им иногда предоставляются сурдопереводчики, возможности которых недостаточны на практике. Согласно данным Всемирной организации здравоохранения[1], на 2021 год в мире примерно 466 млн человек (более 5 % от общего количества населения земного шара, из них 34 млн дети) страдают полной глухотой или испытывают проблемы со слухом. Кроме того, каждый третий человек в возрасте старше 65 лет сталкивается с проблемой снижения качества слуха и, согласно оценкам, к 2050 году более 2 млрд человек будут страдать глухотой или испытывать проблемы со слухом. По этой причине необходимо развитие новых интеллектуальных технологий (систем) эффективного автоматического машинного сурдоперевода для организации естественного и универсального человеко-машинного взаимодействия.

Один из основных критериев успешной организации человеко-машинного взаимодействия [1] — естественность коммуникации [2]. В идеальном случае взаимодействие человека с машиной в терминах модальности не должно отличаться от межличностной коммуникации. Главное отличие современных интеллектуальных систем — применение способов коммуникации, характерных для общения между людьми. Неотъемлемой составляющей естественной коммуникации служат невербальные средства взаимодействия (в частности, язык тела и жестикуляция) [3]. Так например, при помощи жестов можно взаимодействовать с интеллектуальной информационной системой на некотором расстоянии и в условиях сильных фоновых шумов, когда звучащая речь малоэффективна [4]. Заметим, что в настоящее время полноценных автоматических систем машинного сурдоперевода не существует. Это обусловлено рядом факторов технического характера (визуальные шумы, окклюзии, изменение освещенности), недостаточностью описания грамматики и семантики жестовых языков (ЖЯ) для задач интерпретации жестов, а также факторами, которые напрямую связаны с диктором. Так гендерные и возрастные характеристики отдельно взятого диктора могут влиять на размеры ладоней, удаленность рук от тела, расстояние между активной и пассивной рукой и скорость представления разнообразных лексических жестовых единиц или клауз. Данные влияния гендерных и возрастных аспектов на невербальное поведение широко описано в гендерной лингвистике [5, 6], невербальной семиотике [7] и психологии [8], но такие влияния практически не учтены в контексте машинного сурдоперевода и имплементации различных методов цифровой обработки изображений, компьютерного зрения и нейросетевых моделей. В результате можно сделать вывод о том, что задача машинного сурдоперевода — комплексное междисциплинарное исследование и требует принципиально новых научно-технических результатов, которые позволят максимально эффективно распознавать отдельные жесты, а также элементы ЖЯ с учетом интеллектуального анализа гендерных и возрастных характеристик диктора.

Цель работы — разработка и применение нового метода автоматического извлечения наиболее информативных пространственно-временных визуальных признаков (характеристик) из лексических жестовых единиц или клауз на основе предварительных знаний о гендерно-возрастных характеристиках диктора. Метод может найти применение для автоматического распознавания отдельных ручных жестов и элементов ЖЯ (машинный сурдоперевод).

## Предмет исследования

С помощью жестов и языка тела человек может передавать свои мысли, чувства, а также эмоции. Такие способы общения определяются как невербальная коммуникация. В лингвистике ЖЯ принято описывать

[1] Глухота и потеря слуха [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs300/ru/, свободный. Яз. рус. (дата обращения: 22.03.2022).

жесты при помощи конечного набора дифференциальных признаков [9, 10]: конфигурация руки [11], место выполнения жеста (локализации) и характер исполнения [12, 13]. Конфигурация руки задает определенную ориентацию ладони, конфигурацию и направление пальцев [14, 15]. Информация о месте выполнения жеста — релевантна, локализация всех жестов обычно постоянна [4]. Можно сделать вывод, что исполнение любого жеста в полной мере связано с его статическим или динамическим характером. Отметим, что для статических жестов характерна устойчивость признака локализации, тогда как при исполнении динамических жестов локализация и конфигурация изменяются во времени [16]. Другой известный факт — во время воспроизведения жеста диктором общее понимание складывается из множества движений руки (одноручные жесты) или рук (двуручные жесты) [17, 18]. Все описанные особенности показа жестов диктором должны учитываться при машинном сурдопереводе. Настоящая работа посвящена интеллектуальному анализу влияния дополнительных факторов (гендерных и возрастных характеристик диктора) на надежность автоматических систем распознавания как отдельных жестов, так и ЖЯ.

Данное исследование представляет продолжение существующих исследований [1, 3, 4, 16, 19, 20] авторов настоящей работы в таких областях, как машинный сурдоперевод, повышение качества межличностной коммуникации и человеко-машинное взаимодействие.

## Описание метода

Современные методы автоматического распознавания жестовой информации [21–24] на основе интегральных нейросетевых моделей (End-to-End, E2E) могут уступать по скорости базовым подходам [3, 16], но существенно превосходить их в точности. В связи с этим в работе [20] был представлен собственный метод многомодального видеоанализа движений рук для автоматического распознавания ручных жестов и элементов ЖЯ на основе модели E2Ev1. Основная идея метода заключалась в анализе информативных пространственно-временных визуальных характеристик жеста в определенный момент времени с помощью предварительно обученной нейросетевой модели с долгой кратковременной памятью (Long Short-Term Memory, LSTM) [25].

В настоящей работе предложены следующие улучшения метода:

— расширен список из информативных пространственно-временных визуальных характеристик жеста;
— применена нейросетевая модель E2Ev2 для распознавания конфигураций рук диктора (вместо 2D сверточной нейросети). Функциональная схема метода показана на рис. 1.

Нейросетевая модель LSTM анализирует пространственно-временные визуальные характеристики жеста: 1) нормализованных 2D и 3D расстояний от лица до руки (зона артикуляции жеста); 2) нормализованной 2D площади пересечения лица и руки (в случае отсутствия пересечения, площадь нулевая); 3) конфигурации руки (представляется числовым значением класса от 0 до 22); 4) гендерная характеристика о дикторе; 5) возрастная характеристика о дикторе. Для решения задачи машинной классификации гендерных и возрастных характеристик диктора использованы нейросетевые модели[1] из программной платформы с открытым исходным кодом Deepface [26]. Таким образом, в отличие от метода [20] к списку визуальных характеристик добавлена гендерная информация о дикторе, представленная числовым значением класса (0 — мужчина, 1 — жен-

[1] Deepface Models [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://github.com/serengil/deepface/tree/master/deepface, свободный. Яз. англ. (дата обращения: 23.03.2022).

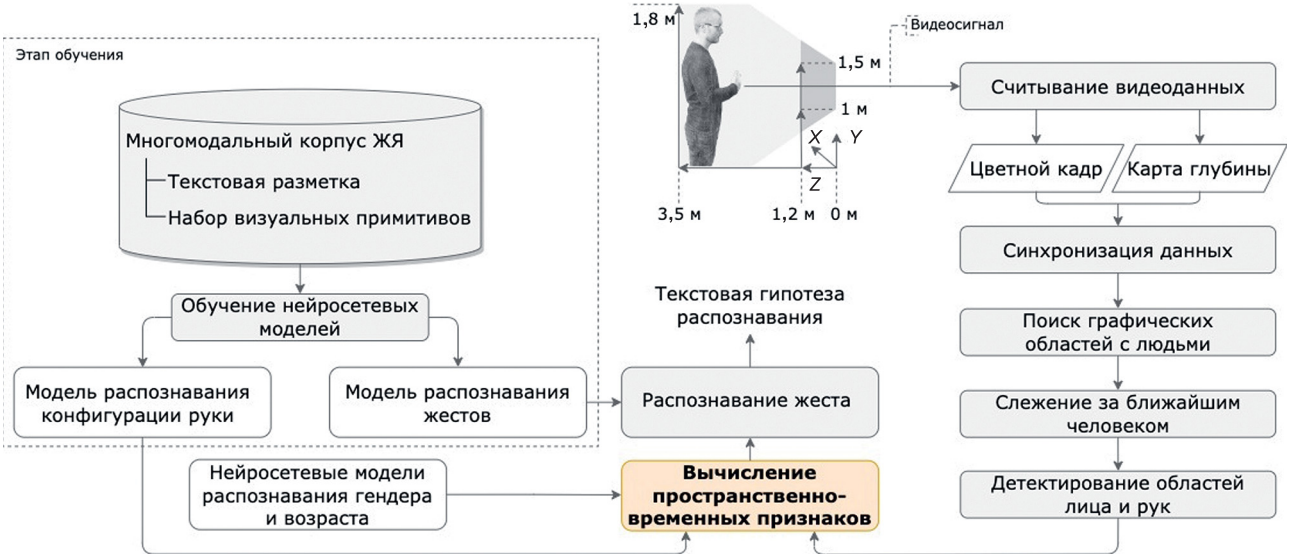



*Рис. 1*. Функциональная схема метода многомодального видеоанализа движений рук для распознавания изолированных жестов рук и элементов жестовых языков

*Fig. 1*. Functional diagram of the method of multimodal video analysis of hand movements for recognizing isolated hand gestures and sign language elements

щина), а также возрастная информация — от 0 до 100 лет. В результате новый список из информативных пространственно-временных визуальных характеристик жеста расширяется с 3 до 5 пунктов.

На рис. 2 показан наглядный пример изменения конфигурации руки в зависимости от пола и возраста для одного и того же динамического жеста. Из рис. 2 видно, что один и тот же динамический жест показывается по-разному тремя дикторами. Можно заметить, что женщины показывают схожие конфигурации руки, при этом их отличия видны в развороте руки и положении пальцев. В то время как мужчина показывает совершенно отличные от дикторов женского пола конфигурации руки. Таким образом, возникает необходимость в учете гендерной и возрастной информации при многомодальном видеоанализе движений рук для распознавания изолированных жестов рук и элементов ЖЯ.

По сравнению с исследованием в [20] количественный показатель (точность) процесса распознавания конфигураций рук диктора улучшен за счет предлагаемой архитектуры нейросетевой модели E2Ev2 (рис. 3).

Архитектура E2Ev2 получает на вход последовательности изображений (конфигурации рук диктора) с разрешением 192 × 192 пикселов и длиной в 30 кадров (Sequence_Length). Далее происходит извлечение карт признаков размерностью 512 × 6 × 6 из каждого изображения полученной последовательности с помощью 3D сверточного слоя (3D Conv) и модифицированных остаточных блоков (Residual Blocks модели ResNet-18), включающих модули внимания (Squeeze-and-Attention, SA). В свою очередь слой подвыборки (Global Average Polling) преобразует карты признаков из размерности 512 × 6 × 6 в одномерные вектора размерностью 30 × 512. Dropout — метод регуляризации нейросети, предотвращающий переобучение сети. В заключении нейросетевая модель LSTM обрабатывает полученные одномерные вектора и выдает результат в виде распознавания конфигураций рук диктора.



*Рис. 2*. Примеры видеокадров показа одного и того же динамического жеста тремя дикторами: женщина в возрасте 34 лет (по прогнозу модели распознавания возраста) (*a*); женщина (21 год) (*b*); мужчина (21 год) (*c*)

*Fig. 2*. Examples of video frames showing the same dynamic gesture by three speakers: woman, 34 y.o. (as predicted by the age recognition model) (*a*); woman, 21 y.o. (*b*); man, 21 y.o. (*c*)

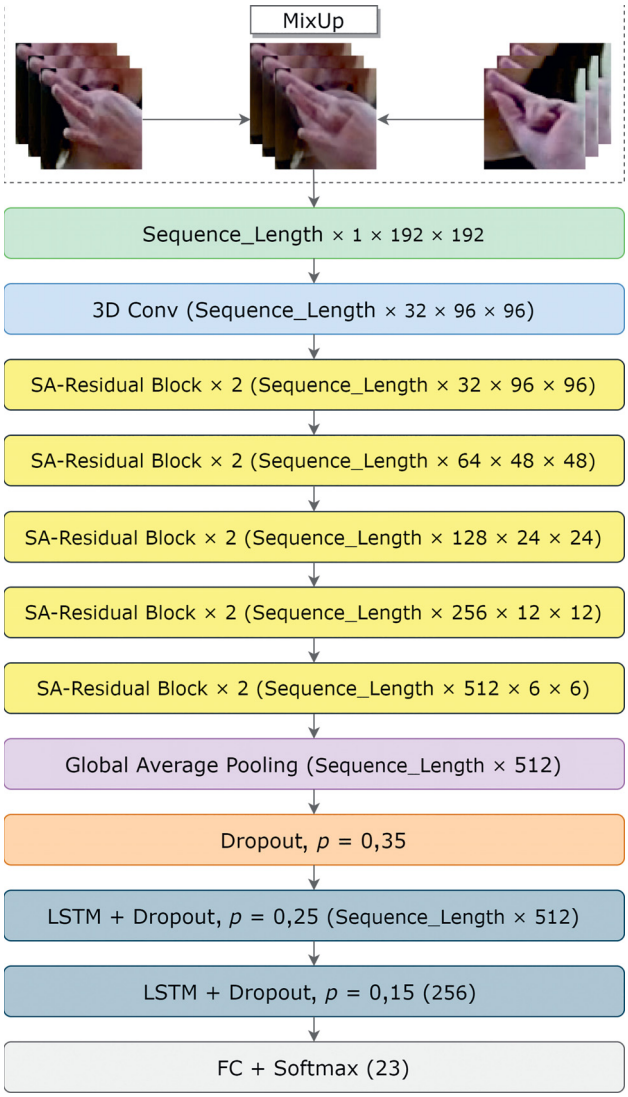



*Рис. 3*. Архитектура нейросетевой модели E2Ev2 для распознавания конфигураций рук диктора

*Fig. 3*. E2Ev2 architecture of a neural network model for recognizing speaker's hand configurations

Все видеопоследовательности, которые поступают на вход представленной архитектуры E2Ev2, разбиваются на сегменты, состоящие из 30 кадров и частичным перекрытием в 40 % (12 кадров). В случаях, когда кадров недостаточно (конец видеопоследовательности), то недостающие кадры заполняются последним кадром. Также для уменьшения вычислительных затрат все цветные изображения преобразуются в градации серого и нормализуются до 192 × 192 пикселов. Увеличение общего контраста изображений достигается путем выравнивания гистограммы яркости пикселов[1].

Возможный риск переобучения нейросетевой модели E2Ev2 минимизируется за счет процесса аугментации данных MixUp (применяется только к 60 % изображений и их меткам) [27, 28]. Параметр объединения двух изображений и бинарных векторов их меток (классов конфигураций рук) изменяется от 30 до 70 %, при соблюдении условия нулевой прозрачности для генерируемого изображения (сумма всегда равна 100 %). С математической точки зрения, процесс MixUp может быть представлен в виде:

$$\tilde{x} = \lambda \times x_1 + (1 - \lambda) \times x_2,$$
$$\mathbf{y} = \lambda \times \mathbf{y}_1 + (1 - \lambda) \times \mathbf{y}_2,$$

где $\tilde{x}$ и $\mathbf{y}$ — сгенерированное новое изображение и вектор меток; $\lambda$ — параметр объединения двух изображений или бинарных векторов; $x_1$ и $x_2$ — первое и второе исходные случайные изображения; $\mathbf{y}_1$ и $\mathbf{y}_2$ — первый и второй исходные бинарные вектора меток, которые всегда соответствуют выбранным случайным изображениям $x_1$ и $x_2$.

Отметим, что для оставшихся 40 % бинарных векторов меток, которые не попали в выборку для процесса аугментации данных MixUp, применяется техника их сглаживания (Label Smoothing, LS)[2], представленная в виде:

$$\mathbf{y} = (1 - \alpha) \times \mathbf{y}' + \alpha / K,$$

где $\alpha$ — параметр степени сглаживания бинарного вектора меток; $\mathbf{y}'$ — исходный бинарный вектор меток; $K$ — количество классов (конфигураций рук диктора).

В результате формируется новый вектор размерностью, равной количеству конфигураций рук диктора (в данном случае всего 23 конфигурации), в котором значение, равное единице, заменяется на 0,75, а все оставшиеся 22 нулевых значения — на 0,25.

Для непосредственного процесса извлечения визуальных признаков из изображений с конфигурациями рук диктора использована обученная с нуля модифицированная нейросетевая модель с архитектурой 3DResNet-18[3], в которую был добавлен модуль внимания SA [29] и отключен последний слой. Таким образом, каждый сегмент видеопоследовательности состоит из набора визуальных признаков, размерность которых равна 30 × 512, где 30 — это длина последовательности кадров сегмента, а 512 — количество извлеченных визуальных признаков.

Извлеченные визуальные признаки являются входными данными для нейросетевой модели LSTM. В свою очередь, полносвязный слой (Fully Connected, FC) вместе с функцией активации (Softmax) с количеством нейронов, равных 23, формирует вектор вероятностных значений, сумма которых равна 1. Индекс правильно предсказанной конфигурации руки диктора имеет наибольшее вероятностное значение.

Заметим, что все представленные значения архитектуры нейросетевой модели E2Ev2, необходимые

[1] Random Equalize [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://pytorch.org/vision/stable/generated/torchvision.transforms.RandomEqualize.html, свободный. Яз. англ. (дата обращения: 26.03.2022).

[2] Label Smoothing [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://paperswithcode.com/method/label-smoothing, свободный. Яз. англ. (дата обращения: 26.03.2022).

[3] 3D ResNet [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://pytorch.org/hub/facebookresearch_pytorchvideo_resnet, свободный. Яз. англ. (дата обращения: 26.03.2022).

для ее обучения, подобраны на основе эмпирических экспериментов.

### Эксперименты и результаты

Метод с представленными улучшениями был апробирован на данных (18 одноручных жестов, по аналогии с [20]) из многомодального корпуса элементов русского ЖЯ TheRuSLan [30, 31]. Процесс обучения производился на 11 дикторах, а тестирование — на мужчине и женщине. В роли планировщика скорости обучения использован Cosine Annealing с холодным перезапуском (Cosine Annealing Warm Restarts, Cosine WR)[1], значения которого варьировались от 0,0001 до 0,001. График измерение скорости обучения (*lr*, отн. ед.) нейросетевой модели относительно количества эпох, представлен на рис. 4.

Из рис. 4 видно, что максимальное количество эпох установлено в значение 100. Если на протяжении 10 эпох улучшение показателя точности не наблюдалось, то процесс машинного обучения останавливался, и тогда лучшим считался результат, полученный за все время обучения нейросетевой модели.

Программная реализация метода выполнена на языке программирования Python v.3.9. Для машинного обучения использована платформа с открытым исходным кодом PyTorch v.1.11.0 в связке с ее расширением в виде модуля TorchVision v.0.12.0.

Сравнение предложенной архитектуры E2Ev2 и обученной на ее основе нейросетевой модели для распознавания конфигураций рук диктора происходит с ранее обученными архитектурами 2D моделей сверточных нейросетей (табл. 1), которые были представлены в работе [24].

Для многомодального машинного сурдоперевода использована глубокая нейросеть LSTM, архитектура и процесс обучения которой подробно описаны в работе [20]. На вход нейросети LSTM направлен вектор признаков, состоящий из 5 пространственно-временных визуальных характеристик жестов. Объединение характеристик в один вектор осуществлен путем простой их конкатенации. В табл. 2 представлены сравнительные результаты итогового процесса распознавания 18 одноручных жестов русского ЖЯ из многомодального корпуса TheRuSLan [30, 31].

Сравнение представленного метода многомодального видеоанализа движений рук для автоматического распознавания ручных жестов и элементов ЖЯ с описанными улучшениями (E2Ev2) произведено с реализованными ранее методами [20], а именно: генетическим программированием на основе графов (RGGP); моделей эллиптического распределения (EDS); многопоточной рекуррентной нейросетью (MRNN); рекуррентной 3D сверточной нейросетью (R3DCNN); многомерным методом на основе сверточных нейросетей (MultiD-CNN) и первой версией предложенного метода на основе интегральных нейросетевых моделей E2Ev1.

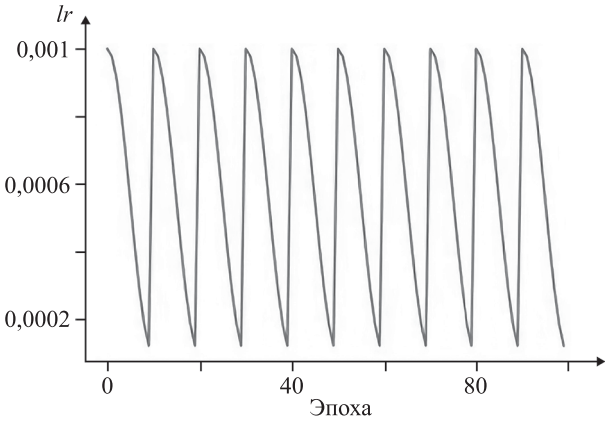



*Рис. 4*. График изменения скорости обучения (*lr*) нейросетевой модели относительно количества эпох

*Fig. 4*. Graph of the learning rate (*lr*) of a neural network model versus the number of epochs

[1] Cosine Annealing Warm Restarts [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://pytorch.org/docs/stable/generated/torch.optim.lr_scheduler.CosineAnnealingWarmRestarts.html, свободный. Яз. англ. (дата обращения: 26.03.2022).

*Таблица 1*. Сравнение точности распознавания конфигураций рук для различных архитектур нейросетевых моделей

*Table 1*. Comparison of hand configuration recognition accuracy for different architectures of neural network models

| Размер входных изображений (ширина × высота × глубина) | Нейросетевая архитектура | Ссылка | Точность, % |
|---|---|---|---|
| 224 × 224 × 3 | EfficientNetB0 | [24] | 70,32 |
| 224 × 224 × 3 | MobileNetV2 | | 72,47 |
| 224 × 224 × 3 | VGG19 | | 73,19 |
| 299 × 299 × 3 | InceptionV3 | | 75,92 |
| 224 × 224 × 3 | ResNet152V2 | | 76,11 |
| 224 × 224 × 3 | DenseNet169 | | 76,54 |
| 299 × 299 × 3 | Xception | | 80,03 |
| 299 × 299 × 3 | InceptionResNetV2 | | 81,44 |
| 331 × 331 × 3 | NASNetLarge | | 84,44 |
| 528 × 528 × 3 | EfficientNetB7 | | 87,01 |
| 192 × 192 × 1 | Предложенная архитектура E2Ev2 (рис. 3) | — | **94,78** |

*Таблица 2*. Сравнительная таблица методов распознавания жестов
*Table 2.* Comparative table of gesture recognition methods

| Метод распознавания | Модальности видеоданных | Ссылка | Точность, % |
|---|---|---|---|
| Restricted Graph-Based Genetic Programming (RGGP) | RGB | [20] | 69,74 |
| | Карта глубины | | 53,07 |
| | RGB + карта глубины | | 74,28 |
| Elliptical Density Shape Model (EDS) | | | 77,43 |
| Multi-Stream Recurrent Neural Network (MRNN) | RGB | | 68,23 |
| | Карта глубины | | 73,54 |
| | RGB + карта глубины | | 79,98 |
| Recurrent 3D Convolutional Neural Network (R3DCNN) | | | 84,67 |
| Multi-Dimensional Convolutional Neural Networks (MultiD-CNN) | | | 87,38 |
| E2Ev1 | | | 88,92 |
| Предложенный метод (E2Ev2) | | — | **91,14** |

Из табл. 1 и 2 следует, что за счет расширенного списка из информативных пространственно-временных визуальных характеристик жеста можно получить увеличение точности распознавания жестов.

## Заключение

В работе получены результаты, которые могут найти широкое применение в областях научной и социальной деятельности, а также в сферах социального обслуживания, медицины, образования, робототехники, в центрах обслуживания населения и для взаимодействия с людьми в различных чрезвычайных ситуациях. Кроме того, за последние годы все более широкое распространение находят ассистивные и социальные роботы, ориентированные на выполнение определенных прикладных задач, а также естественного человеко-машинного взаимодействия. Для взаимодействия с такими роботами классических графических и сенсорных пользовательских интерфейсов недостаточно. Помимо них, необходимы интуитивные и естественные для человека интерфейсы (например, на основе жестовой модальности). В свою очередь, интеллектуальный анализ и оценка важности влияния гендерных и возрастных характеристик диктора на машинный сурдоперевод позволят максимально эффективно распознавать отдельные жесты рук, а также элементы жестовых языков.

Предложенная нейросетевая модель E2Ev2 имеет значительный инновационный потенциал, так как позволяет повысить точность и робастность машинного сурдоперевода и, в свою очередь, естественность человеко-машинного взаимодействия в целом.

## Литература


1. Ryumin D., Kagirov I., Ivanko D., Axyonov A., Karpov A. Automatic detection and recognition of 3D manual gestures for human-machine interaction // International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2019. V. 42. N 2/W12. P. 179–183. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W12-179-2019
2. Карпов А.А., Юсупов Р.М. Многомодальные интерфейсы человеко-машинного взаимодействия // Вестник Российской академии наук. 2018. Т. 88. № 2. С. 146–155. https://doi.org/10.7868/S0869587318020056
3. Ryumin D., Karpov A.A. Towards automatic recognition of sign language gestures using kinect 2.0 // Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). 2017. V. 10278. P. 89–101. https://doi.org/10.1007/978-3-319-58703-5_7
4. Рюмин Д. Метод автоматического видеоанализа движений рук и распознавания жестов в человеко-машинных интерфейсах // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2020. Т. 20. № 4. С. 525–531. https://doi.org/10.17586/2226-1494-2020-20-4-525-531
5. Томская М.В., Маслова Л.Н. Гендерные исследования в отечественной лингвистике // Русский язык в современном обществе: функциональные и статусные характеристики. М., 2005. С. 102–130.
6. Carli L., LaFleur S., Loeber C. Nonverbal behavior, gender, and influence // Journal of Personality and Social Psychology. 1995. V. 68. N 6. P. 1030–1041. https://doi.org/10.1037/0022-3514.68.6.1030


## References


1. Ryumin D., Kagirov I., Ivanko D., Axyonov A., Karpov A. Automatic detection and recognition of 3D manual gestures for human-machine interaction. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2019, vol. 42, no. 2/W12, pp. 179–183. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W12-179-2019
2. Karpov A.A., Yusupov R.M. Multimodal interfaces of human–computer interaction. *Herald of the Russian Academy of Sciences*, 2018, vol. 88, no. 1, pp. 67–74. https://doi.org/10.1134/S1019331618010094
3. Ryumin D., Karpov A.A. Towards automatic recognition of sign language gestures using kinect 2.0. *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 2017, vol. 10278, pp. 89–101. https://doi.org/10.1007/978-3-319-58703-5_7
4. Ryumin D. Automated hand detection method for tasks of gesture recognition in human-machine interfaces. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2020, vol. 20, no. 4, pp. 525–531 (in Russian). https://doi.org/10.17586/2226-1494-2020-20-4-525-531
5. Tomskaia M.V., Maslova L.N. Gender research in national linguistics. *Russian language in the modern society: functional and status characteristics*. Moscow, 2005, pp. 102–130. (in Russian)
6. Carli L., LaFleur S., Loeber C. Nonverbal behavior, gender, and influence. *Journal of Personality and Social Psychology*, 1995, vol. 68, no. 6, pp. 1030–1041. https://doi.org/10.1037/0022-3514.68.6.1030

7. Iriskhanova O., Cienki A. The semiotics of gestures in cognitive linguistics: Contribution and challenges // Вопросы конгинивной лингвистики. 2018. Т. 4. С. 25–36. https://doi.org/10.20916/1812-3228-2018-4-25-36
8. Masson-Carro I., Goudbeek M., Krahmer E. Coming of age in gesture: A comparative study of gesturing and pantomiming in older children and adults // Proc. of the 4th Gesture and Speech in Interaction Conference (GESPIN). 2015. P. 1–7.
9. Reviewed Work: Sign language structure: An outline of the visual communication systems of the American deaf by William C. Stokoe, Jr. // Language. 1961. V. 37. N 2. P. 269–271. https://doi.org/10.2307/410856
10. Димскис Л.С. Изучаем жестовый язык. М.: Издательский центр «Академия», 2002. 128 с.
11. Sonkusare J., Chopade N., Sor R., Tade S. A review on hand gesture recognition system // Proc. of the 1st International Conference on Computing, Communication, Control and Automation. 2015. P. 790–794. https://doi.org/10.1109/ICCUBEA.2015.158
12. De Smedt Q., Wannous H., Vandeborre J. Heterogeneous hand gesture recognition using 3D dynamic skeletal data // Computer Vision and Image Understanding. 2019. V. 181. P. 60–72. https://doi.org/10.1016/j.cviu.2019.01.008
13. Grif M., Prikhodko A., Bakaev M. Recognition of signs and movement epentheses in Russian Sign Language // Communications in Computer and Information Science. 2022. V. 1503. P. 67–82. https://doi.org/10.1007/978-3-030-93715-7_5
14. Гришина Е.А. Кольцо и щепоть: семантика соединенных пальцев в русской жестикуляции // Компьютерная лингвистика и интеллектуальные технологии. 2014. № 13. С. 182–202.
15. Zhang C., Yang X., Tian Y. Histogram of 3D Facets: A characteristic descriptor for hand gesture recognition // Proc. of the 10th International Conference Automatic Face and Gesture Recognition (FG). 2013. P. 6553754. https://doi.org/10.1109/FG.2013.6553754
16. Рюмин Д.А., Кагиров И.А. Подходы к автоматическому распознаванию жестовой информации: аппаратное обеспечение и методы // Пилотируемые полеты в космос. 2021. № 3(40). С. 82–99. https://doi.org/10.34131/MSF.21.3.82-99
17. Camgoz C.N., Hadfield S., Koller O., Bowden R. SubUNets: End-to-end hand shape and continuous sign language recognition // Proc. of the 16th International Conference on Computer Vision (ICCV). 2017. P. 3075–3084. https://doi.org/10.1109/ICCV.2017.332
18. Гриф М.Г., Королькова О.О., Приходько А.Л. Распознавание жестовой речи с учетом комбинаторных изменений жестов // Информатика: проблемы, методы, технологии: Материалы XXI Международной научно-технической конференции. 2021. С. 1387–1393.
19. Ryumin D., Kagirov I., Axyonov A., Pavlyuk N., Saveliev A., Kipyatkova I., Zelezny M., Mporas I., Karpov A. A multimodal user interface for an assistive robotic shopping cart // Electronics. 2020. V. 9. N 12. P. 1–25. https://doi.org/10.3390/electronics9122093
20. Axyonov A., Ryumin D., Kagirov I. Method of multi-modal video analysis of hand movements for automatic recognition of isolated signs of Russian sign language // International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2021. V. 44. N 2/W1. P. 7–13. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIV-2-W1-2021-7-2021
21. Wu J., Zhang Y., Zhao X. A prototype-based generalized zero-shot learning framework for hand gesture recognition // Proc. of the 25th International Conference on Pattern Recognition (ICPR). 2021. P. 3435–3442. https://doi.org/10.1109/ICPR48806.2021.9412548
22. Voskou A., Panousis K.P., Kosmopoulos D., Metaxas D.N., Chatzis S. Stochastic transformer networks with linear competing units: Application to end-to-end SL translation // Proc. of the 18th International Conference on Computer Vision (ICPR). 2021. P. 11926–11935. https://doi.org/10.1109/ICCV48922.2021.01173
23. Jiang S., Sun B., Wang L., Bai Y., Li K., Fu Y. Skeleton aware multi-modal sign language recognition // Proc. of the Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2021. P. 3408–3418. https://doi.org/10.1109/CVPRW53098.2021.00380
24. Рюмин Д. Модели и методы автоматического распознавания элементов русского жестового языка для человеко-машинного взаимодействия: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Университет ИТМО. 2020. 352 с. [Электронный ресурс]. URL: http://fppo.ifmo.ru/dissertation/?number=246869, свободный. Яз. рус. (дата обращения: 26.03.2022).

7. Iriskhanova O., Cienki A. The semiotics of gestures in cognitive linguistics: Contribution and challenges. *Voprosy Kognitivnoy Lingvistiki*, 2018, vol. 4, pp. 25–36. https://doi.org/10.20916/1812-3228-2018-4-25-36
8. Masson-Carro I., Goudbeek M., Krahmer E. Coming of age in gesture: A comparative study of gesturing and pantomiming in older children and adults. *Proc. of the 4th Gesture and Speech in Interaction Conference (GESPIN)*, 2015, pp. 1–7.
9. Reviewed Work: Sign language structure: An outline of the visual communication systems of the American deaf by William C. Stokoe, Jr. *Language*, 1961, vol. 37, no. 2, pp. 269–271. https://doi.org/10.2307/410856
10. Dimskis L.S. *Learning Sign Language*. Moscow, Akademija Publ., 2002, 128 p. (in Russian)
11. Sonkusare J., Chopade N., Sor R., Tade S. A review on hand gesture recognition system. *Proc. of the 1st International Conference on Computing, Communication, Control and Automation*, 2015, pp. 790–794. https://doi.org/10.1109/ICCUBEA.2015.158
12. De Smedt Q., Wannous H., Vandeborre J. Heterogeneous hand gesture recognition using 3D dynamic skeletal data. *Computer Vision and Image Understanding*, 2019, vol. 181, pp. 60–72. https://doi.org/10.1016/j.cviu.2019.01.008
13. Grif M., Prikhodko A., Bakaev M. Recognition of signs and movement epentheses in Russian Sign Language. *Communications in Computer and Information Science*, 2022, vol. 1503, pp. 67–82. https://doi.org/10.1007/978-3-030-93715-7_5
14. Grishina E.A. Ring and grappolo: Fingertip connections in Russian gesticulation and their meanings. *Komp'juternaja Lingvistika i Intellektual'nye Tehnologii*, 2014, no. 13, pp. 182–202. (in Russian)
15. Zhang C., Yang X., Tian Y. Histogram of 3D Facets: A characteristic descriptor for hand gesture recognition. *Proc. of the 10th International Conference Automatic Face and Gesture Recognition (FG)*, 2013, pp. 6553754. https://doi.org/10.1109/FG.2013.6553754
16. Ryumin D.A., Kagirov I.A. Approaches to automatic gesture recognition: hardware and methods overview. *Manned Spaceflight*, 2021, no. 3(40), pp. 82–99. (in Russian). https://doi.org/10.34131/MSF.21.3.82-99
17. Camgoz C.N., Hadfield S., Koller O., Bowden R. SubUNets: End-to-end hand shape and continuous sign language recognition. *Proc. of the 16th International Conference on Computer Vision (ICCV)*, 2017, pp. 3075–3084. https://doi.org/10.1109/ICCV.2017.332
18. Grif M.G., Korolkova O.O., Prikhodko A.L. Sign speech recognition taking into account combinatorial changes of gestures. *Problems, Methods, and Technologies in the Computer Science. Proceedings of the XXI International Scientific and Technical Conference*, 2021, pp. 1387–1393. (in Russian)
19. Ryumin D., Kagirov I., Axyonov A., Pavlyuk N., Saveliev A., Kipyatkova I., Zelezny M., Mporas I., Karpov A. A multimodal user interface for an assistive robotic shopping cart. *Electronics*, 2020, vol. 9, no. 12, pp. 1–25. https://doi.org/10.3390/electronics9122093
20. Axyonov A., Ryumin D., Kagirov I. Method of multi-modal video analysis of hand movements for automatic recognition of isolated signs of Russian sign language. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2021, vol. 44, no. 2/W1, pp. 7–13. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIV-2-W1-2021-7-2021
21. Wu J., Zhang Y., Zhao X. A prototype-based generalized zero-shot learning framework for hand gesture recognition. *Proc. of the 25th International Conference on Pattern Recognition (ICPR)*, 2021, pp. 3435–3442. https://doi.org/10.1109/ICPR48806.2021.9412548
22. Voskou A., Panousis K.P., Kosmopoulos D., Metaxas D.N., Chatzis S. Stochastic transformer networks with linear competing units: Application to end-to-end SL translation. *Proc. of the 18th International Conference on Computer Vision (ICPR)*, 2021, pp. 11926–11935. https://doi.org/10.1109/ICCV48922.2021.01173
23. Jiang S., Sun B., Wang L., Bai Y., Li K., Fu Y. Skeleton aware multi-modal sign language recognition. *Proc. of the Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2021, pp. 3408–3418. https://doi.org/10.1109/CVPRW53098.2021.00380
24. Ryumin D. *Models and Methods for Automatic Recognition of Russian Sign Language Elements for Human-Machine Interaction.* Academic dissertation candidate of engineering. ITMO University, 2020, 352 p. Available at: http://fppo.ifmo.ru/dissertation/?number=246869 (accessed 26.03.2022). (in Russian)
25. Winata G.I., Kampman O.P., Fung P. Attention-based LSTM for psychological stress detection from spoken language using distant

25. Winata G.I., Kampman O.P., Fung P. Attention-based LSTM for psychological stress detection from spoken language using distant supervision // Proc. of the International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). 2018. P. 6204–6208. https://doi.org/10.1109/ICASSP.2018.8461990
26. Serengil S.I., Ozpinar A. LightFace: A Hybrid deep face recognition framework // Proc. of the Innovations in Intelligent Systems and Applications Conference (ASYU). 2020. P. 9259802. https://doi.org/10.1109/ASYU50717.2020.9259802
27. Zhang H., Cisse M., Dauphin Y.N., Lopez-Paz D. MixUp: Beyond empirical risk minimization // Proc. of the 6th International Conference on Learning Representations (ICLR). 2018.
28. Dresvyanskiy D., Ryumina E., Kaya H., Markitantov M., Karpov A., Minker W. End-to-end modeling and transfer learning for audiovisual emotion recognition in-the-wild // Multimodal Technologies and Interaction. 2022. V. 6. N 2. P. 11. https://doi.org/10.3390/mti6020011
29. Zhong Z., Lin Z.Q., Bidart R., Hu X., Daya I.B., Li Z., Zheng W., Li J., Wong A. Squeeze-and-attention networks for semantic segmentation // Proc. of the Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2020. P. 13062–13071. https://doi.org/10.1109/cvpr42600.2020.01308
30. Kagirov I., Ivanko D., Ryumin D., Axyonov A., Karpov A. TheRuSLan: Database of Russian Sign Language // Proc. of the 12th Conference on Language Resources and Evaluation (LREC). 2020. P. 6079–6085.
31. Кагиров И.А., Рюмин Д.А., Аксёнов А.А., Карпов А.А. Мультимедийная база данных жестов русского жестового языка в трехмерном формате // Вопросы языкознания. 2020. № 1. С. 104–123. https://doi.org/10.31857/S0373658X0008302-1

supervision. *Proc. of the International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, 2018, pp. 6204–6208. https://doi.org/10.1109/ICASSP.2018.8461990
26. Serengil S.I., Ozpinar A. LightFace: A Hybrid deep face recognition framework. *Proc. of the Innovations in Intelligent Systems and Applications Conference (ASYU)*, 2020, pp. 9259802. https://doi.org/10.1109/ASYU50717.2020.9259802
27. Zhang H., Cisse M., Dauphin Y.N., Lopez-Paz D. MixUp: Beyond empirical risk minimization. *Proc. of the 6th International Conference on Learning Representations (ICLR)*, 2018.
28. Dresvyanskiy D., Ryumina E., Kaya H., Markitantov M., Karpov A., Minker W. End-to-end modeling and transfer learning for audiovisual emotion recognition in-the-wild. *Multimodal Technologies and Interaction*, 2022, vol. 6, no. 2, pp. 11. https://doi.org/10.3390/mti6020011
29. Zhong Z., Lin Z.Q., Bidart R., Hu X., Daya I.B., Li Z., Zheng W., Li J., Wong A. Squeeze-and-attention networks for semantic segmentation. *Proc. of the Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2020, pp. 13062–13071. https://doi.org/10.1109/cvpr42600.2020.01308
30. Kagirov I., Ivanko D., Ryumin D., Axyonov A., Karpov A. TheRuSLan: Database of Russian Sign Language. *Proc. of the 12th Conference on Language Resources and Evaluation (LREC)*, 2020, pp. 6079–6085.
31. Kagirov I.A., Ryumin D.A., Axyonov A.A., Karpov A.A. Multimedia database of russian sign language items in 3D. *Voprosy Jazykoznanija*, 2020, no. 1, pp. 104–123. (in Russian). https://doi.org/10.31857/S0373658X0008302-1

## Авторы

**Аксёнов Александр Александрович** — младший научный сотрудник, Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук, Санкт-Петербург, 199178, Российская Федерация, SC 57203963345, https://orcid.org/0000-0002-7479-2851, axyonov.a@iias.spb.su

**Кагиров Ильдар Амирович** — научный сотрудник, Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук, Санкт-Петербург, 199178, Российская Федерация, SC 25121369400, https://orcid.org/0000-0003-1196-1117, kagirov@iias.spb.su

**Рюмин Дмитрий Александрович** — кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук, Санкт-Петербург, 199178, Российская Федерация, SC 57191960214, https://orcid.org/0000-0002-7935-0569, ryumin.d@iias.spb.su

## Authors

**Alexandr A. Axyonov** — Junior Researcher, Saint Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS), Saint Petersburg, 199178, Russian Federation, SC 57203963345, https://orcid.org/0000-0002-7479-2851, axyonov.a@iias.spb.su

**Ildar A. Kagirov** — Scientific Researcher, Saint Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS), Saint Petersburg, 199178, Russian Federation, SC 25121369400, https://orcid.org/0000-0003-1196-1117, kagirov@iias.spb.su

**Dmitry A. Ryumin** — PhD, Senior Researcher, Saint Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS), Saint Petersburg, 199178, Russian Federation, SC 57191960214, https://orcid.org/0000-0002-7935-0569, ryumin.d@iias.spb.su

*Статья поступила в редакцию 30.03.2022*
*Одобрена после рецензирования 19.04.2022*
*Принята к печати 30.05.2022*

*Received 30.03.2022*
*Approved after reviewing 19.04.2022*
*Accepted 30.05.2022*

Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ
май–июнь 2022 Том 22 № 3 http://ntv.ifmo.ru/
SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL OF INFORMATION TECHNOLOGIES, MECHANICS AND OPTICS
May–June 2022 Vol. 22 No 3 http://ntv.ifmo.ru/en/
ISSN 2226-1494 (print) ISSN 2500-0373 (online)

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК УНИВЕРСИТЕТ ИТМО
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ

doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-3-594-599

# Web app for quick evaluation of subjective answers using natural language processing

**Meenakshi Anurag Thalor[1]✉, Pradeep B. Mane[2], Vishaka Mandge[3]**

[1,2,3] AISSMS Institute of Information Technology, Pune, 411001, India

[1] meenakshi.thalor@aissmsioit.org✉, https://orcid.org/0000-0001-7048-7289
[2] pbmane6829@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-3252-9983
[3] mandge1999@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-1667-4814

**Abstract**

In current digital climate, education sector is evolving as the computer technology advances. Education is being digitized: online classes, online examination methods are conducted, etc. During examination, students are assessed by their answers having given for the question set by a teacher. Today many tools are available to assess the performance of a student using multi choice questions tools which provide instant evaluation, but there are available very limited and operational tools where subjective type answer of students are evaluated. This paper presents a web-based application to address this challenge. It automates the process of subjective answers checking and generates results through using natural language processing methods, like keyword matching semantic, lexical analysis and cosine similarity. Experiments show that appreciated by the teacher result and the system estimation does not have much difference which signifies that the system evaluates answers with a 97 % accuracy. The presented system not only reduces manpower but also eliminates the traditional method of conducting exclusively subjective exams using paper documents. It also eliminates the delays in the paper checking, result generation process. The cases of information leak are being reduced and the objectivity of the assessment is being increased.

**Keywords**

cosine similarity, information extraction, keyword matching, natural language processing

**For citation:** Meenakshi Anurag T., Pradeep B.M., Vishaka M. Web app for quick evaluation of subjective answers using natural language processing. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2022, vol. 22, no. 3, pp. 594–599. doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-3-594-599

УДК 004.89

# Веб-приложение для быстрой оценки субъективных ответов с использованием обработки естественного языка

**Талор Минакши Анураг[1]✉, Мане Прадип Б.[2], Мандж Вишака[3]**

[1,2,3] AISSMS Институт информационных технологий, Пуна, 411001, Индия

[1] meenakshi.thalor@aissmsioit.org✉, https://orcid.org/0000-0001-7048-7289
[2] pbmane6829@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-3252-9983
[3] mandge1999@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-1667-4814

**Аннотация**

В современном цифровом пространстве развитие образования связано с продвижением компьютерных технологий. Происходит цифровизация образования: проводятся онлайн-классы, онлайн-экзамены и т. д. В период проведения экзамена учащиеся оцениваются педагогом по ответам на заданные вопросы. На настоящий момент доступно множество инструментов оценки успеваемости учащегося с использованием вопросов с несколькими вариантами ответов. Такой подход обеспечивает мгновенную оценку, однако инструментов, дающих возможность оценки субъективных ответов учащихся еще недостаточно. В работе представлено веб-приложение

© Meenakshi Anurag T., Pradeep B.M., Vishaka M., 2022

для решения этой проблемы. Приложение позволяет автоматизировать процесс проверки субъективных ответов и генерировать результаты с применением методов обработки естественного языка, таких как семантическое сопоставление ключевых слов, лексический анализ и косинусное сходство. Экспериментальные результаты показали, что ответы, оцененные педагогами, и предложенная система дают близкие результаты. Полученная точность ответов составила 97 %. Представленная система не только сокращает рабочее время, но и позволяет устранить традиционный метод проведения исключительно субъективных экзаменов с использованием бумажных документов. В результате сокращается время получения результатов и время проверки. Уменьшается утечка информации и повышается объективность оценки.

**Ключевые слова**

косинусное сходство, извлечение информации, сопоставление ключевых слов, обработка естественного языка

**Ссылка для цитирования:** Минакши Анураг Т., Прадип Б.М., Вишака М. Веб-приложение для быстрой оценки субъективных ответов с использованием обработки естественного языка // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2022. Т. 22, № 3. С. 594–599 (на англ. яз.). doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-3-594-599

## Introduction

In digital Era, most of the educational institutes conduct online examination in the form of multi choice questions using some tools/applications. Some of these tools/applications are also capable to accept subjective answers which need to be manually evaluated by a teacher since these tools are not trained enough to provide an accurate result for subjective type questions.

An example of an existing model that uses Natural Language Processing (NLP) [1–4] is Paper Pater. The application is designed to analyze the text and predict the plagiarism of the submitted text. It even helps improve the text grammatically using certain machine learning algorithms. E-rater Scoring Engine is a grading system that provides a grade for the essays submitted by students using NLP. Passage ranking system is used to rank a set of passages based on its relevance to a certain topic. N-gram and Support Vector Machines models are used for ranking these passages. Another example is Machine Reading and Comprehension (MRC) model; it retrieves the most relevant passage based on the question. These systems are good at parsing the textual data and they produce the required results. In literature, the system is found using Knowledge extraction [5], feature identification [6] and deep learning techniques [7] in Question Answer Matching [8–13].

## Methods and Materials

The web based application system uses NLP to analyze the descriptive answers provided by a student as well as by the teacher. Fig. 1 shows the system architecture of Web-based Application for revolutionary assessment where student and teacher are two main users in addition to admin/superuser. Students and teacher can perform various activities as clearly depicted in pictorial representation. All the data once received will be stored in the MongoDB database and can be retrieved using Python to perform the further operations.

Web based application system includes revolutionary assessment and instant evaluation of following modules: Login Module, Preprocessing Module, Information Extraction, Score Generation.

**Login module**

This module is used for authentication purpose of the participants: superuser, teacher and student. Each person has his/her unique ID and password to login and work in the system after the system authenticates the user; after that the user can further access all the functionalities of the role.

1. Teacher login

The teacher is validated by using his/her unique ID and password. Once validation is done, the teacher gets logged in to his/her dashboard. Teacher has to define the character set for his model answers in order to exclude them during preprocessing. The teacher can set document where he/she can add questions and answers into the database. The teacher can also view results of all students and of each student separately as well as each subject individually. The key feature of the system is that the teacher can only view the answers of the student but cannot modify the answer. The questions will appear in the exam for the students and the answers stored in the database will be used as the model answer for comparison with the student's answers.

2. Student login

Student can login into the system by using his/her unique PRN number and password. After authentication the student gets logged in to the system and can see his/her dashboard. The students can view their previous test results but a student cannot view the current result until he/she has passed any test. To pass the test the student has to click the "Take test" option, select the subject from

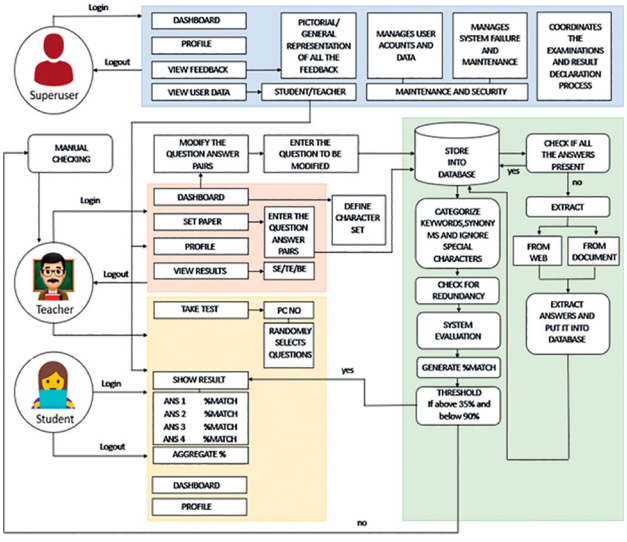



*Fig. 1.* Activity Diagram for Web Based Application System for Revolutionize Assessment and Instant Evaluation

the dropdown menu and then click on starting the test. As soon as the student has passed his/her test, the test results are automatically submitted into the database. And after completion of the test there is a feedback form for every student to which the superuser has access. The feedback form also gets stored into the database. The students can view their results once they are announced.

3. Superuser login

The superuser is an admin who handles all the database issues, failures, user registrations and any errors. He/she is responsible for the maintenance of the system and can respond to any kind of issues. The superuser has access to the feedback given by the students after passing the test.

**Preprocessing module**

During preprocessing, the sentence tokenization and work tokenization is applied to the descriptive answer of student and teacher as shown in Fig. 2. RAKE is Rapid Automatic Keyword Extraction algorithm available in Natural Language Toolkit (NLTK), the purpose of this algorithm is to determine key phrases in text using frequency of word and coexistence of words with other words. The individual tokens are parsed to eliminate the stop and repeated words, and keywords are extracted at this stage. The keyword matching of teacher and students is also performed here.

**Information Extraction**

Information extraction plays a significant role in NLP since only important keywords are considered after the irrelevant information is removed and keywords are ranked. The important and relevant keywords in descriptive answers of student and teacher are identified and matched using cosine similarity at this stage. Cosine similarity [14–15] is the evaluation measure to get the similarity between two documents. There exists a motivation behind selection of cosine similarity measure, it gives a ranking to documents corresponding to a given keywords irrespective of the size of the document. The larger the cosine angle, the less similarity exists between two documents, and vice versa. The cosine similarity is calculated for each answer proposed by the student. Following equation is used to calculate the cosine similarity between the teacher's answer and the student's answer.

$$Cosine\ Similarity = \frac{Dot\ product\ (teacher, student)}{||teacher|| \times ||student||}.$$

The final result is calculated by aggregating these values which will then be converted into percentile. Cosine similarity is used to compare the answers of teacher and

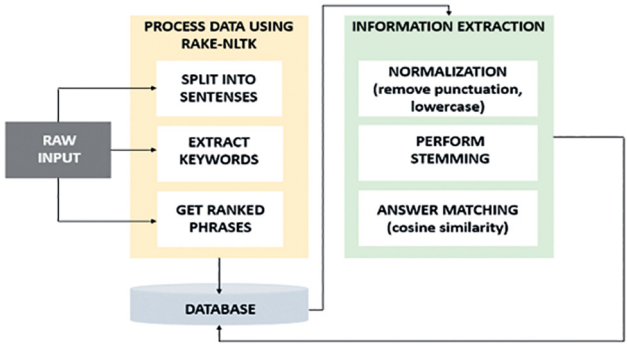



*Fig. 2*. Natural language processing modules or revolutionary assessment and instant evaluation

student in general. If the student's answer has obtained the maximum marks, it means that its cosine similarity was low.

**Score generation**

The score of each student is shown to them in the form of pictorial representation, i.e., a graph. The graph represents the total percentage of the accuracy of the student's answers in comparison with the teacher's answers. Both the teacher and the student can view their result for a particular subject and also view the marks allotted for individual question.

## Results and discussions

Test has been conducted in the college premises in two subjects: Machine Learning and Cloud Computing. In total, five questions were given for each subject, with five marks each. The result is generated in the form of a percentile score. Manual checking of the answers is done by the college professors to compare the results. Table 1 shows that the answers assessed by the teachers and the answers assessed by the system doesn't have much variation. This result of comparison shows that the system evaluates answers with a great accuracy. Table 2 depicts the percentile score which is generated for individual question as well. Proposed system provides the accuracy of 97 % on the mentioned subjects.

Following screenshots represent the entire web portal created in order to revolutionize the traditional system of taking an exam using pen and paper.

**Student registration**

Fig. 3, *a* shows the student registration webpage. The student is required to do the registration before attending

*Table 1*. Results comparison, %

| Results | System generated results for subjects | | Teacher provided results for subjects | |
|---|---|---|---|---|
| | Machine Learning | Cloud Computing | Machine Learning | Cloud Computing |
| 1 | 72.09 | 85.63 | 74.23 | 84.23 |
| 2 | 65.21 | 73.84 | 67.15 | 74.36 |
| 3 | 32.83 | 47.82 | 38.56 | 46.67 |
| 4 | 54.36 | 63.45 | 57.67 | 68.14 |
| 5 | 82.91 | 90.80 | 87.16 | 89.83 |

*Table 2.* Question wise results

| Question | Total marks | Percentage obtained, % |
|---|---|---|
| What is Machine learning? | 5 | 42.5 |
| Mention the difference between Data Mining and Machine learning? | 5 | 42.2 |
| What is ‘Over-fitting’ in Machine learning? | 5 | 21.0 |
| How can you avoid over-fitting? | 5 | 18.9 |
| What is ‘Training set’ and ‘Test set’? | 5 | 14.3 |

the exam. The Unique ID, i.e., the issued by the university PRN number, is used as the username.

**Student login**

After a student logs in, he/she is directed to the dashboard from where he/she can access several functionalities such as view profile, take test, view result and logout. The dashboard consists of some valuable information for the student such as time management, guidelines for the examination, etc. The student can even view his/her profile as shown in Fig. 3, *b*.

**Take test**

Once the student has successfully logged in to the system, he/she can now take test. In order to start the test as shown in Fig. 4, *a*, the student has to read carefully the instructions and to choose the subject. The time allotted for the exam is half an hour and, once the test is submitted, the student is directed to the feedback section where he/she is asked if he/she is satisfied with the new way of giving the subjective examinations and if he/she liked the procedure and feel that the entire system is developed properly.

**View results**

The student can view his/her results once they have been declared. The results won’t be visible if the student didn’t show up for the exam. The student can view the result of the individual subject as well as of the individual questions. Pictorial representations are used in order to make it easy for the student to view and understand the results as shown in Fig. 4, *b*.

**Teacher registration and login**

Fig. 5, *a* shows teacher’s login page where the teacher also registers in the system using a Unique ID and, after login, is directed to the Dashboard where he/she can access functionalities such as view profile, set document, view results and logout.

**Set document and view results**

Fig. 5, *b* shows the teacher document setting webpage. The teacher needs to specify the model file that the system evaluates with the students file. Once all the students have appeared for the examination, the teacher can view the overall results of the students.

**Superuser and additional features**

The superuser has the functionality of viewing the feedback of the students in order to improve the system as shown in Fig. 6. The system generates a false message whenever it discovers an invalid username and password pair.

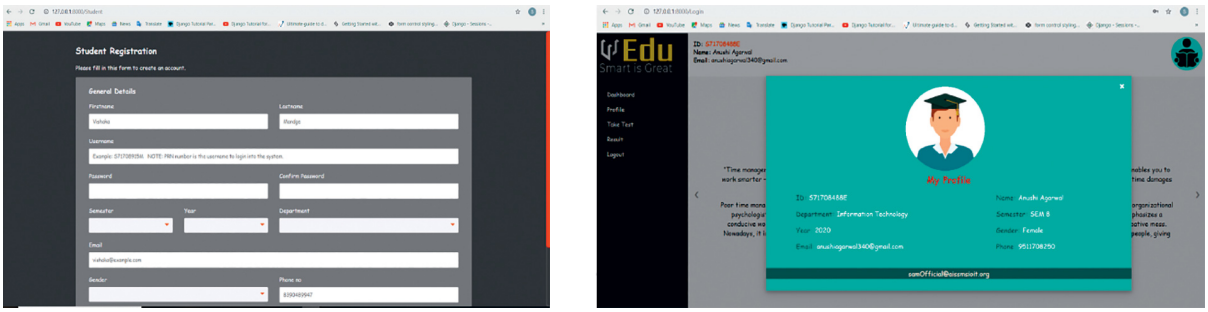



*Fig. 3.* Webpage: student registration (*a*), student logged in (*b*)

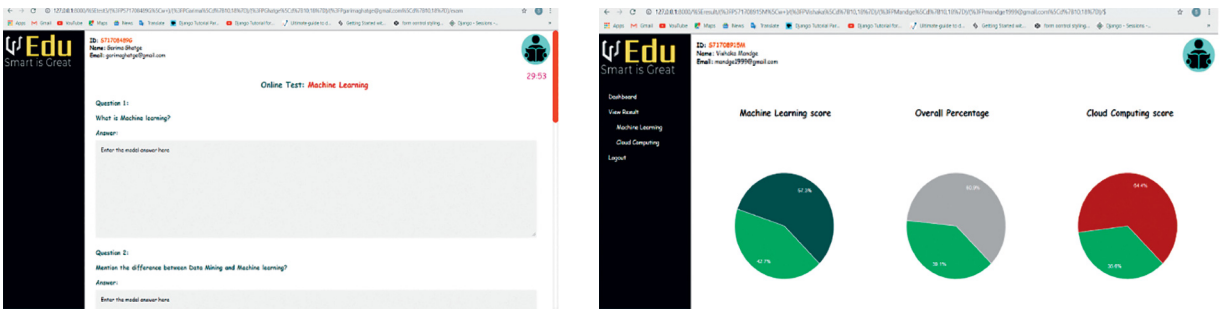



*Fig. 4.* Student’s webpage: test (*a*), results (*b*)

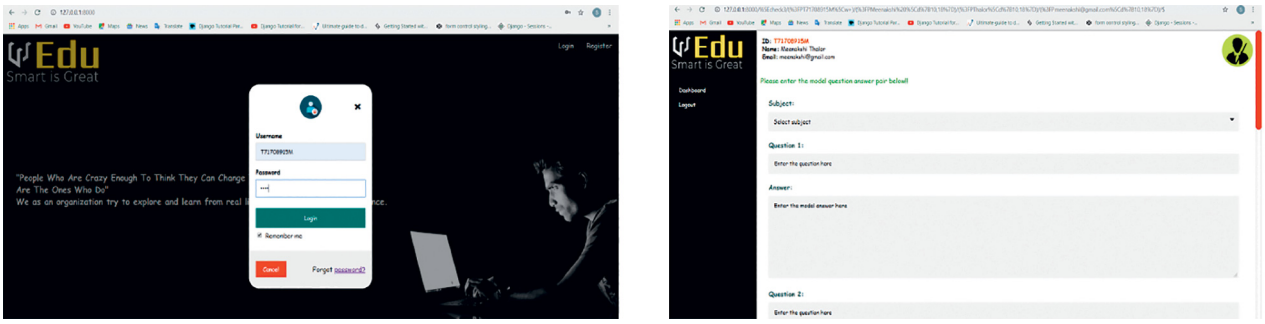



*Fig. 5*. Webpage: teacher's login (*a*), teacher document settings (*b*)

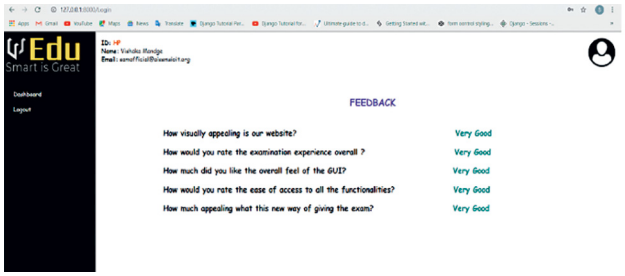



*Fig. 6*. Feedback webpage

## Conclusion

The result is generated in the percentile form and is represented in the form of a graph. The proposed system also shows the individual marks allotted for each question by the student as well as by each teacher. The teacher can see the result of each student and also the answers of the student. The key feature of the system is that the teacher cannot modify the answer of the student. Although the system provides a percentile for the test taken by the student, the system is only fully suitable for subjective answers, which are purely theoretical. The proposed system evaluates answers written in English. The TF-IDF technique used in this way takes into account synonyms for the words that are the same, which results in a limitation for the algorithm so used. So, in future, we plan to include the synonyms in the TF-IDF technique, hence providing a completely new algorithm that gives a much more accurate result. The option of extracting questions and their answers from the web for incomplete data can be one of the future works. The current system is feasible for English language only so in future it can works for other languages as well.

## References

1. Lakshmi V., Ramesh V. Evaluating students' descriptive answers using natural language processing and artificial neural networks. *International Journal of Creative Research Thoughts — IJCRT*, 2017, vol. 5, no. 4, pp. 3168–3173.
2. Patil S.M., Patil S. Evaluating student descriptive answers using natural language processing. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 2014, vol. 3, no. 3, pp. 1716–1718.
3. Yin W., Kann K., Yu M., Schütze H. Comparative study of CNN and RNN for natural language processing. *ArXiv*, 2017, arXiv:1702.01923. https://doi.org/10.48550/arXiv.1702.01923
4. Kate A., Kamble S., Bodkhe A., Joshi M. Conversion of Natural Language Query to SQL Query. *Proc. of the 2nd International conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology (ICECA)*, 2018, pp. 488–491. https://doi.org/10.1109/ICECA.2018.8474639
5. Thangarasu S., Sasikala D. Extracting knowledge from XML document using tree-based association rules. *Proc. of the International Conference on Intelligent Computing Applications (ICICA)*, 2014, pp. 134–137. https://doi.org/10.1109/ICICA.2014.37
6. Mati D.N., Ajdari J., Raufi B., Hamiti M., Selimi B. A Systematic mapping study of language features identification from large text collection. *Proc. of the 8th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO)*, 2019, pp. 8760042. https://doi.org/10.1109/MECO.2019.8760042
7. Cai J., Li J., Li W., Wang J. Deeplearning model used in text classification. *Proc of the 15th International Computer Conference on Wavelet Active Media Technology and Information Processing (ICCWAMTIP)*, 2018, pp. 123–126. https://doi.org/10.1109/ICCWAMTIP.2018.8632592
8. Tan M., Santos C., Xiang B., Zhou B. Improved representation learning for question answer matching. *Proc. of the 54th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics (ACL)*, 2016, pp. 464–473. https://doi.org/10.18653/v1/P16-1044

## Литература

1. Lakshmi V., Ramesh V. Evaluating students' descriptive answers using natural language processing and artificial neural networks // International Journal of Creative Research Thoughts — IJCRT. 2017. V. 5. N 4. P. 3168–3173.
2. Patil S.M., Patil S. Evaluating student descriptive answers using natural language processing // International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT). 2014. V. 3. N 3. P. 1716–1718.
3. Yin W., Kann K., Yu M., Schütze H. Comparative study of CNN and RNN for natural language processing // ArXiv. 2017. arXiv:1702.01923. https://doi.org/10.48550/arXiv.1702.01923
4. Kate A., Kamble S., Bodkhe A., Joshi M. Conversion of Natural Language Query to SQL Query // Proc. of the 2nd International conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology (ICECA). 2018. P. 488–491. https://doi.org/10.1109/ICECA.2018.8474639
5. Thangarasu S., Sasikala D. Extracting knowledge from XML document using tree-based association rules // Proc. of the International Conference on Intelligent Computing Applications (ICICA). 2014. P. 134–137. https://doi.org/10.1109/ICICA.2014.37
6. Mati D.N., Ajdari J., Raufi B., Hamiti M., Selimi B. A Systematic mapping study of language features identification from large text collection // Proc. of the 8th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO). 2019. P. 8760042. https://doi.org/10.1109/MECO.2019.8760042
7. Cai J., Li J., Li W., Wang J. Deeplearning model used in text classification // Proc of the 15th International Computer Conference on Wavelet Active Media Technology and Information Processing (ICCWAMTIP). 2018. P. 123–126. https://doi.org/10.1109/ICCWAMTIP.2018.8632592
8. Tan M., Santos C., Xiang B., Zhou B. Improved representation learning for question answer matching // Proc. of the 54th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics (ACL). 2016. P. 464–473. https://doi.org/10.18653/v1/P16-1044

9. Lan Y., Wang S., Jiang J. Knowledge base question answering with a matching-aggregation model and question-specific contextual relations. *IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, 2019, vol. 27, no. 10, pp. 1629–1638. https://doi.org/10.1109/TASLP.2019.2926125
10. Grappy A., Grau B., Falco M-H., Ligozat A-L., Robba I., Vilnat A. Selecting answers to questions from Web documents by a robust validation process. *Proc. of the IEEE/WIC/ACM International Conferences on Web Intelligence and Intelligent Agent Technology*, 2011, pp. 55–62. https://doi.org/10.1109/WI-IAT.2011.210
11. Lan Y., Wang S., Jiang J. Knowledge base question answering with a matching-aggregation model and question specific contextual relations. *IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, 2019, vol. 27, no. 10, pp. 1629–1638. https://doi.org/10.1109/TASLP.2019.2926125
12. Zhang W., Ming Z., Zhang Y., Liu T., Chua T. Capturing the semantics of key phrases using multiple languages for question retrieval. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 2016, vol. 28, no. 4, pp. 888–900. https://doi.org/10.1109/TKDE.2015.2502944
13. Pakray P., Pal S., Bandyopadhyay S., Gelbukh A. Automatic answer validation system on English language. *Proc. of the 3rd International Conference on Advanced Computer Theory and Engineering*, 2010, pp. V6329–V6333. https://doi.org/10.1109/ICACTE.2010.5579166
14. Thalor M.A. A descriptive answer evaluation system using cosine similarity technique. *Proc. of the 4th International Conference on Communication information and Computing Technology (ICCICT)*, 2021. https://doi.org/10.1109/ICCICT50803.2021.9510170
15. Mandge V.A., Thalor M.A. Revolutionize cosine answer matching technique for question answering system. *Proc. of the International Conference on Emerging Smart Computing and Informatics (ESCI)*, 2021, pp. 335–339. https://doi.org/10.1109/ESCI50559.2021.9396864



9. Lan Y., Wang S., Jiang J. Knowledge base question answering with a matching-aggregation model and question-specific contextual relations // IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing. 2019. V. 27. N 10. P. 1629–1638. https://doi.org/10.1109/TASLP.2019.2926125
10. Grappy A., Grau B., Falco M-H., Ligozat A-L., Robba I., Vilnat A. Selecting answers to questions from Web documents by a robust validation process // Proc. of the IEEE/WIC/ACM International Conferences on Web Intelligence and Intelligent Agent Technology. 2011. P. 55–62. https://doi.org/10.1109/WI-IAT.2011.210
11. Lan Y., Wang S., Jiang J. Knowledge base question answering with a matching-aggregation model and question specific contextual relations // IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing. 2019. V. 27. N 10. P. 1629–1638. https://doi.org/10.1109/TASLP.2019.2926125
12. Zhang W., Ming Z., Zhang Y., Liu T., Chua T. Capturing the semantics of key phrases using multiple languages for question retrieval // IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering. 2016. V. 28. N 4. P. 888–900. https://doi.org/10.1109/TKDE.2015.2502944
13. Pakray P., Pal S., Bandyopadhyay S., Gelbukh A. Automatic answer validation system on English language // Proc. of the 3rd International Conference on Advanced Computer Theory and Engineering. 2010. P. V6329–V6333. https://doi.org/10.1109/ICACTE.2010.5579166
14. Thalor M.A. A descriptive answer evaluation system using cosine similarity technique // Proc. of the 4th International Conference on Communication information and Computing Technology (ICCICT). 2021. https://doi.org/10.1109/ICCICT50803.2021.9510170
15. Mandge V.A., Thalor M.A. Revolutionize cosine answer matching technique for question answering system // Proc. of the International Conference on Emerging Smart Computing and Informatics (ESCI). 2021. P. 335–339. https://doi.org/10.1109/ESCI50559.2021.9396864


## Authors


**Thalor Meenakshi Anurag** — PhD, Associate Professor, AISSMS Institute of Information Technology, Pune, 411001, India, SC 57190340673, https://orcid.org/0000-0001-7048-7289, meenakshi.thalor@aissmsioit.org
**Mane Pradeep B.** — PhD, Principal, AISSMS Institute of Information Technology, Pune, 411001, India, SC 36450914400, https://orcid.org/0000-0002-3252-9983, pbmane6829@gmail.com
**Mandge Vishaka** — B.E., Student, AISSMS Institute of Information Technology, Pune, 411001, India, https://orcid.org/0000-0002-1667-4814, mandge1999@gmail.com


## Авторы


**Минакши Анураг Талор** — PhD, доцент, AISSMS Институт информационных технологий, Пуна, 411001, Индия, SC 57190340673, https://orcid.org/0000-0001-7048-7289, meenakshi.thalor@aissmsioit.org
**Прадип Б. Мане** — PhD, директор, AISSMS Институт информационных технологий, Пуна, 411001, Индия, SC 36450914400, https://orcid.org/0000-0002-3252-9983, pbmane6829@gmail.com
**Вишака Мандж** — бакалавр, студент, AISSMS Институт информационных технологий, Пуна, 411001, Индия, https://orcid.org/0000-0002-1667-4814, mandge1999@gmail.com



*Received 30.10.2021*
*Approved after reviewing 25.04.2022*
*Accepted 25.05.2022*

*Статья поступила в редакцию 30.10.2021*
*Одобрена после рецензирования 25.04.2022*
*Принята к печати 25.05.2022*



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ
май–июнь 2022 Том 22 № 3 http://ntv.ifmo.ru/
SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL OF INFORMATION TECHNOLOGIES, MECHANICS AND OPTICS
May–June 2022 Vol. 22 No 3 http://ntv.ifmo.ru/en/
ISSN 2226-1494 (print) ISSN 2500-0373 (online)
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК УНИВЕРСИТЕТ ИТМО ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

MODELING AND SIMULATION

doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-3-600-609
УДК 621.396.67.01

# Обоснование путей построения и оценка эффективности применения пространственно распределенной системы информационных сенсоров для мониторинга обстановки

**Алексей Владимирович Зюзин[1], Марина Владимировна Кныш[2], Сергей Николаевич Разиньков[3], Александр Васильевич Тимошенко[4]✉**

[1,2] Ярославское высшее военное училище противовоздушной обороны, Ярославль, 150001, Российская Федерация
[3] Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», Воронеж, 394065, Российская Федерация
[4] Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, 125993, Российская Федерация

[1] aleksey.zyuzin@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-8315-0586
[2] mariku2713@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-2674-9074
[3] razinkovsergey@rambler.ru, https://orcid.org/0000-0002-3987-0607
[4] u567ku78@gmail.com✉, https://orcid.org/0000-0002-9791-142X

**Аннотация**
На основе принципов структурно-информационного анализа обстановки обоснованы пути построения системы пространственно распределенных информационных сенсоров с функциями реконфигурации структуры и изменения состава в соответствии с задачами и условиями мониторинга. С использованием метода неопределенных множителей Лагранжа разработана процедура рационального выбора конфигурации системы сенсоров для контроля заданной зоны пространства. Получены экспериментальные оценки точности определения местоположения объектов в пространственно распределенных системах пассивной радиолокации при использовании в качестве информационных сенсоров азимутально-угломестных пеленгаторов и приемников-измерителей времени прихода сигналов. Выявлены закономерности повышения точности местоопределения объектов за счет выбора числа и позиций информационных сенсоров.

**Ключевые слова**
мониторинг обстановки, система информационных сенсоров, среднеквадратическая ошибка определения местоположения объекта

**Благодарности**
Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-19-00481

**Ссылка для цитирования:** Зюзин А.В., Кныш М.В., Разиньков С.Н., Тимошенко А.В. Обоснование путей построения и оценка эффективности применения пространственно распределенной системы информационных сенсоров для мониторинга обстановки // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2022. Т. 22, № 3. С. 600–609. doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-3-600-609

# Substantiation of construction and evaluation ways of the application efficiency for spatially distributed system of information sensors to provide environment monitoring

**Alexey V. Zyuzin[1], Marina V. Knysh[2], Sergey N. Razinkov[3], Alexander V. Tymoshenko[4]✉**

[1,2] Yaroslavl Higher Military School of Air Defense, Yaroslavl, 150001, Russian Federation
[3] Air Force Education and Research Center “The Zhukovsky - Gagarin Air Force Academy”, Voronezh, 394065, Russian Federation
[4] Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, 125993, Russian Federation

© Зюзин А.В., Кныш М.В., Разиньков С.Н., Тимошенко А.В., 2022

[1] aleksey.zyuzin@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-8315-0586
[2] mariku2713@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-2674-9074
[3] razinkovsergey@rambler.ru, https://orcid.org/0000-0002-3987-0607
[4] u567ku78@gmail.com✉, https://orcid.org/0000-0002-9791-142X

**Abstract**
Based on the principles of structural information analysis of the situation, the ways to build a system of spatially distributed information sensors with functions of reconfiguring the structure and changing the composition in accordance with monitoring tasks and conditions are justified. Using the method of indeterminate Lagrange multipliers, a procedure has been developed for rationally selecting the configuration of a sensor system to achieve stability and reliability of control over a given area of space. Experimental estimates of the determining location accuracy of objects in spatially distributed passive radar systems are obtained when azimuth-angular direction finders and signal detectors are used as information sensors. Regularities of accuracy increase due to selection of number and positions of information sensors are revealed.

**Keywords**
environment monitoring, information sensor system, standard error of object location determination, recurrence linear filtering of parameters

**Acknowledgements**
This work is supported by the Russian Science Foundation under grant № 21-19-00481.

**For citation:** Zyuzin A.V., Knysh M.V., Razinkov S.N., Tymoshenko A.V. Substantiation of construction and evaluation ways of the application efficiency for spatially distributed system of information sensors to provide environment monitoring. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2022, vol. 22, no. 3, pp. 600–609 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-3-600-609

## Введение

Интенсивное развитие технологий создания объектов, характеризуемых малыми уровнями фоновой контрастности, а также радиоэлектронных средств со структурной и энергетической скрытностью работы [1, 2] определяет потребности совершенствования систем мониторинга [2]. Ввиду возможного нарушения устойчивости процедур обнаружения и распознавания объектов, обусловленного нестабильностью проявления и низкой точностью оценки демаскирующих признаков отдельными информационными сенсорами [3, 4], необходимо наращивать информационные ресурсы мониторинга за счет структурно-информационного анализа обстановки [5, 6].

Суть структурно-информационного анализа обстановки заключается в согласованном применении группы пространственно распределенных информационных сенсоров с общим центром сбора, обработки информации и управления для оценки переменных признаков объектов с целью определения их типа (назначения) и динамических состояний в масштабе времени, близком к реальному [6]. Система мониторинга организуется путем создания каналов информационного взаимодействия с функциями передачи добываемой информации для централизованной обработки и обобщения, а также доведения команд управления информационным сенсорам.

На информационные сенсоры возлагаются задачи обнаружения и нахождения количественной меры демаскирующих признаков, содержащихся в параметрах принимаемых сигналов. В системах активной радиолокации демаскирующие признаки объектов выявляются по результатам обработки сигналов, отраженных радиолокационными целями, а в системах пассивной радиолокации — по результатам обнаружения и оценки частотно-временных параметров собственных излучений объектов [7]. На основе комплексной обработки демаскирующих признаков в разнесенных точках пространства в системах пассивной радиолокации определяется местоположение объектов [8].

Наличие множества информационных сенсоров позволяет изменять состав и выполнять реконфигурацию структуры системы мониторинга за счет активизации сенсоров, которые в текущий момент времени характеризуются наилучшими возможностями выявления демаскирующих признаков [5] объектов в контролируемой зоне.

Комплексная обработка данных, поступающих от различных сенсоров, обусловливает синергетические эффекты прироста эффективности мониторинга обстановки относительно показателей, достижимых при объединении результатов функционирования отдельных информационных сенсоров. В частности, в системах пассивной радиолокации за счет измерения направлений или времени прихода сигналов в разнесенных точках пространства осуществляется оценка местоположения передатчиков [5, 6]. Для определения позиций излучателей по измерениям направлений прихода сигнала требуется применять пространственно распределенные системы с минимальным комплектом из $N = 2$ сенсоров; при оценке координат объектов по измерениям времени прихода сигналов в различных точках пространства необходимо задействовать не менее $N = 3$ сенсоров [8].

Координаты объекта инвариантны к изменениям фоновой контрастности демаскирующих признаков [5, 7]. Они позволяют проводить пространственную селекцию излучателей, что, в свою очередь, обеспечивает снижение ошибок установления принадлежности различных сигналов с перекрывающимися по значениям частотно-временными параметрами отдельным источникам и способствует повышению достоверности распознавания (классификации) объектов.

В настоящей работе определены пути построения пространственно распределенной системы информа-

ционных сенсоров в соответствии с принципами структурно-информационного анализа обстановки [4, 5]. Получены экспериментальные значения среднеквадратических ошибок (СКО) оценивания координат объектов при изменении направлений и времени прихода сигналов в различных точках пространства, и исследованы возможности повышения точности выполняемых изменений в зоне мониторинга за счет выбора числа и позиций информационных сенсоров.

Цель работы — обоснование процедуры рационального выбора конфигурации системы для контроля установленной зоны пространства и распределения информационных сенсоров в соответствии с условиями и задачами мониторинга обстановки.

## Обоснование путей построения пространственно распределенной системы мониторинга обстановки

Для полномасштабного и надежного контроля обстановки, достижимого при рациональном размещении информационных сенсоров в пространстве исходя из условий наилучшего использования ресурса, состав и структуру системы мониторинга требуется выбирать в соответствии со следующими положениями.

1. Соответствие системы мониторинга целям и задачам анализа обстановки и оценки динамических состояний контролируемых объектов, что позволит сформировать на базе пространственно распределенных информационных сенсоров единое информационное пространство в зоне ответственности.
2. Открытость системы информационных сенсоров с возможностями наращивания ее состава и изменения местоположения компонентов, привлекаемых для выполнения целевых функций мониторинга в текущий момент времени, согласно требованиям к достоверности, полноте и оперативности анализа обстановки.
3. Реализация многоконтурного процесса добывания и обработки информации с возможностями централизованного управления информационными сенсорами в сочетании с их автономной работой [5, 6].
4. Обеспечение непрерывности процессов добывания и обработки информации для постоянного контроля за состоянием и изменениями обстановки независимо от временных циклов функционирования объектов [4, 5].

Основными факторами, повышающими эффективность мониторинга обстановки с применением пространственно распределенной системы информационных сенсоров являются: высокие вероятностно-временные показатели обнаружения объектов, достижимые вследствие выбора комплекта информационных сенсоров, для которых в текущие моменты времени складываются наиболее благоприятные условия функционирования; малые СКО оценки характеристик демаскирующих признаков объектов, обусловленные рациональным выбором числа и позиций размещения сенсоров из множества обладающих возможностями приема и обработки сигналов; непрерывность наблюдения за объектами ввиду возможностей включения в систему мониторинга новых информационных сенсоров при малой степени ухудшения качества приема сигналов за счет воздействия непреднамеренных (случайных) помех, к числу которых относятся маскирующие вторичные излучения в радиоканалах с флюктуирующими параметрами [9, 10], индустриальные и атмосферные радиошумы, а также преднамеренных (организованных) помех, специально создаваемых для защиты контролируемых объектов [1, 6].

Рассмотрим систему мониторинга в виде совокупности из $N$ информационных сенсоров, местоположение которых в ортогональной системе координат характеризуется набором векторов $\mathbf{r}_n = [r_n; \theta_n]^T$, где $r_n = |\mathbf{r}_n|$ — расстояние до $n$-го сенсора относительно центра системы координат; $\theta_n = \arg\mathbf{r}_n$ — угловое положение $n$-го сенсора относительно опорного направления, $n = 1, \ldots, N$; символом «$T$» обозначена операция транспонирования.

Показателем пространственной избирательности приема, поступающего с направления $\theta = \arg\mathbf{r}$, где $\mathbf{r}$ — вектор координат объекта, информация о котором заключена в сигнале, $n$-м сенсором, $n = 1, \ldots, N$, является функция

$$f_n(\theta - \theta_n) = \exp\left(-\frac{|r - r_n|}{r_n}\right), n = 1, \ldots, N;$$

наличие индекса «$n$» означает, что свойства избирательного приема сигналов зависят от местоположения сенсора.

Для построения пространственно распределенной системы мониторинга в соответствии с принципами структурно-информационного анализа обстановки для каждого информационного сенсора устанавливается динамический коэффициент использования $a_n$, $n = 1, \ldots, N$. Максимальные значения динамических коэффициентов $a_n$, $n = 1, \ldots, N$, при пороговых уровнях принимаемых сигналов, задаваемых чувствительностью аппаратуры мониторинга, определяются дальностью действия информационных сенсоров. В частности, применительно к компонентам системы пассивной радиолокации максимальные значения динамических коэффициентов характеризуют электромагнитную доступность источников радиоизлучений [1, 6] в позициях $\mathbf{r}_n$, $n = 1, \ldots, N$; их значения зависят от пространственной структуры канала, электрофизических параметров среды распространения [7, 9, 10] и частоты сигналов.

Граница зоны мониторинга определяется функцией

$$R(\theta) = \sum_{n=1}^{N} a_n f_n(\theta - \theta_n). \quad (1)$$

За счет изменения набора и значений динамических коэффициентов $a_n$, $n = 1, \ldots, N$, в текущий момент времени в соответствии со складывающейся обстановкой и текущими задачами мониторинга выполняется реконфигурация пространственно распределенной системы. Смещение границы (1) может осуществляться за счет изменения числа $N$ и координат $\mathbf{r}_n$, $n = 1, \ldots, N$, сенсоров и, как следствие, функций $f_n(\theta - \theta_n)$, $n = 1, \ldots, N$.

Предельно достижимая площадь зоны, в которой осуществляется мониторинг обстановки системой из $N$ информационных сенсоров, расположенных в точках

с координатами $\mathbf{r}_n$, $n = 1, \ldots, N$, находится из условия максимизации по множеству коэффициентов $a_n$, $n = 1, \ldots, N$, функции

$$\alpha(\theta) = \sum_{n=1}^{N}\sum_{p=1}^{N} a_n C_{np}(\theta) a_p, \qquad (2)$$

где

$$C_{np}(\theta) = f_n(\theta - \theta_n) f_p(\theta - \theta_p),\ n = 1, \ldots, N, \qquad (3)$$

— функция совместной пространственной избирательности приема сигналов объектов мониторинга $n$-м и $p$-м информационными сенсорами, $n, p = 1, \ldots, N$.

Функция (2) характеризует условия доступности для приема и обработки сигналов объектов, дислоцируемых в зоне с границей (1), для парных сочетаний из $N$ сенсоров. Применительно к системам пассивной радиолокации при максимизации функции (2) устанавливается область пространства с границей (1), где местоположение объектов определяется с использованием минимального комплекта информационных сенсоров ($N = 2$). В системах активной радиолокации из $N = 2$ сенсоров за счет максимизации функции (2) находится область пространства, в пределах которой мониторинг может проводиться с коллективной идентификацией наблюдений [11].

Для функционирования системы мониторинга в условиях помех, создаваемых $M$ источниками, требуется изменить зону контроля, граница которой задается функцией (1), при максимизации функции (2).

По природе возникновения помехи подразделяются на два класса [1]: непреднамеренные помехи, создаваемые сторонними источниками электромагнитного излучения [2, 10] в результате нарушения электромагнитной совместимости с информационными сенсорами системы мониторинга; преднамеренные помехи, специально организованные для нарушения работы системы мониторинга за счет ухудшения условий приема и обработки сигналов информационными сенсорами и передачи данных о демаскирующих признаках объектов, выявленных отдельными сенсорами, в центр сбора и обработки информации для комплексного анализа [1].

Деструктивное влияние помех на систему мониторинга может проявляться в форме энергетического подавления приемных устройств путем создания на их входах малых отношений сигнал-помеха, исключающих выявление демаскирующих признаков с требуемым качеством, а также навязывание дезинформации за счет имитации ложных источников [1, 6].

Зададим критерий установления границы зоны мониторинга системой уравнений

$$\alpha(\theta_0) \to \max; \qquad (4.1)$$

$$|R(\theta_m)| = \alpha_m,\ m = 1, \ldots, M, \qquad (4.2)$$

где $\theta_0$ — направление центральной линии сектора углов наблюдения; $\alpha_m$ — предельно допустимые уровни помех, при которых сохраняется требуемая эффективность мониторинга; $\theta_m$ — направления, для которых задаются границы зоны мониторинга с учетом предельно допустимых уровней помех, $m = 1, \ldots, M$.

Уравнение (4.1) представляет собой целевую функцию построения системы мониторинга, а уравнение (4.2) — устанавливает внешние системные ограничения на условия выполнения задач мониторинга при наличии помех.

Совместное выполнение условий, задаваемых уравнениями (4.1) и (4.2), может быть достигнуто за счет выбора весовых коэффициентов информационных сенсоров $a_n$, $n = 1, \ldots, N$, с применением метода неопределенных множителей Лагранжа [12].

Конфигурация системы устанавливается путем задания координат $N$ информационных сенсоров $\mathbf{r}_n$, $n = 1, \ldots, N$, осуществляющих мониторинг в области пространства с границей (1). Взаимное расположение сенсоров при формировании пространственно распределенной системы находится с использованием критерия (4.1) для зоны мониторинга, определяемой коэффициентами $a_n$, $n = 1, \ldots, N$, в (1). Распределение информационных сенсоров в пространстве в соответствии с задачами и условиями мониторинга заключается в нахождении значений этих коэффициентов, при которых с учетом (2) и (3) для направлений $\theta_m$, $m = 1,\ldots, M$, выполняется критерий (4.2).

Граница области мониторинга (1) устанавливается при фиксированном числе и множестве допустимых значений координат $\mathbf{r}_n$, $n = 1, \ldots, N$, сенсоров. Потому условная оптимизация системы мониторинга по критерию (4.1) эквивалентна безусловной оптимизации взаимного расположения информационных сенсоров, обеспечивающей наибольшее значение функции (2) в требуемых направлениях.

При этом весовые коэффициенты сенсоров $a_n$, $n = 1, \ldots, N$, удовлетворяющие критерию (4.1), должны обеспечивать минимум функционала

$$\Phi = \sum_{n=1}^{N}\sum_{p=1}^{N} a_n S_{np} a_p + \sum_{m=0}^{M} \tilde{\lambda}_m \sum_{n=1}^{N} f_n(\theta_m - \theta_n) a_n, \qquad (5)$$

где $\tilde{\lambda}_m$ — неизвестные множители Лагранжа, $m = 1, \ldots, M$,

$$S_{np} = \frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} C_{np}(\theta) d\theta,\ n, p = 1, \ldots, N, \qquad (6)$$

— усредненное значение функции (3) в круговом секторе обзора, выполняемое для нахождения коэффициентов $a_n$, $n = 1, \ldots, N$, при априорной неопределенности направлений прихода сигналов объектов мониторинга.

Минимизация функционала (5) эквивалента нахождению минимального абсолютного значения показателя (2), усредненного в секторах углов мониторинга, при условии, что функция (1), определяющая сектор углов, контролируемый системой информационных сенсоров, принимает значения $\alpha_m$ в $M$ направлениях ($\theta_m$, $\varphi_m$), $m = 1, \ldots, M$, при неизменном значении функции (6).

Приравнивая нулю первую вариацию (5) по переменной $a_n$, $n = 1, \ldots, N$, получим

$$a_n = -\sum_{m=0}^{M} \tilde{\lambda}_m \sum_{p=1}^{N} S_{pn}^{-1} f_p(\theta_m - \theta_n), \qquad (7)$$

где $S_{pn}^{-1}$ — элементы матрицы, формируемой в результате обращения матрицы с элементами $S_{np}$, $n, p = 1, \ldots, N$.

Подставляя (7) в уравнение системы (4.1), получим систему линейных алгебраических уравнений размером $M \times M$ относительно неопределенных множителей Лагранжа

$$\sum_{q=0}^{M}\sum_{n=1}^{N}\sum_{p=1}^{N} f_p(\theta_m - \theta_n) S_{pn}^{-1} f_n(\theta_q - \theta_n)\tilde{\lambda}_q = -\alpha_m, \quad m = 1, \ldots, M \tag{8}$$

В результате подстановки корней $\tilde{\lambda}_m$, $m = 1, \ldots, M$, системы линейных алгебраических уравнений (8) в (7) найдем динамические коэффициенты использования информационных сенсоров $a_n$, $n = 1, \ldots, N$, устанавливающие границу зоны мониторинга (1) при выполнении критерия (4.1).

При функционировании пространственно распределенной системы мониторинга с зоной (1) действуют достаточно сложные и противоречивые закономерности, связывающие условия внешней среды, технические характеристики сенсоров, эффективность решения отдельных задач обработки информации, а также результирующую эффективность мониторинга. При изменении характеристик сенсоров меняются факторы, влияющие на эффективность решения частных информационных задач и отдельных этапов обработки информации в положительном и отрицательном планах. В результате повышения чувствительности аппаратуры мониторинга, с одной стороны, улучшается энергетическая доступность объектов, а с другой — возрастает число источников непреднамеренных помех, воздействующих на информационные сенсоры [6]. Указанные факторы одновременно способствуют возрастанию вероятностно-временных показателей обнаружения отдельных объектов и увеличению времени обработки потоков информации [4, 13] или снижению эффективности разделения и идентификации сигналов различных источников [10, 11].

Для системы из $N$ информационных сенсоров, расположенных равномерно на окружности радиуса $r_0$ при угловом расстоянии друг от друга $2\pi/N$, осуществляется одновременный круговой обзор пространства в плоскости азимута с использованием изотропных антенн. При определении границы зоны мониторинга в уравнениях (1), (3), (5), (8) используются функции $f_n(\theta - \theta_n) \equiv f_n(\theta)$, $n = 1, \ldots, N$.

На рисунке, *a* представлены нормированные на максимальные значения $R_{\max} = \max\limits_{\theta\in[0;2\pi]} R(\theta)$ угловые распределения зон, контролируемых системами мониторинга из $N = 5$ и $N = 15$ информационных сенсоров. Направление центральной линии сектора углов наблюдения $\varphi_0 = 90°$. Значения $\tilde{R}_0$ и $a_n$, $n = 1, \ldots, N$, выбраны таким образом, чтобы сигналы объектов, расположенных в зоне с границей (1), были энергетически доступны для приема каждым сенсором. При этом расстояние $R_{\max}$ для каждой системы изменяется пропорционально соотношению между числом применяемых сенсоров в степени, примерно равной 0,5.

На рисунке, *b* приведены нормированные угловые распределения областей пространства, обслуживаемых системами мониторинга при ограничении относительной дальности действия в $M = 2$ направлениях до $\alpha_m = 0{,}1$, $m = 1, 2$. Для системы из $N = 5$ сенсоров заданы направления $\theta_1 = 13°$ и $\theta_2 = 167°$; рабочая зона системы мониторинга из $N = 15$ сенсоров ограничена путем установления значений $\alpha_m = 0{,}1$, $m = 1, 2$, при $\theta_1 = 30°$ и $\theta_2 = 150°$.

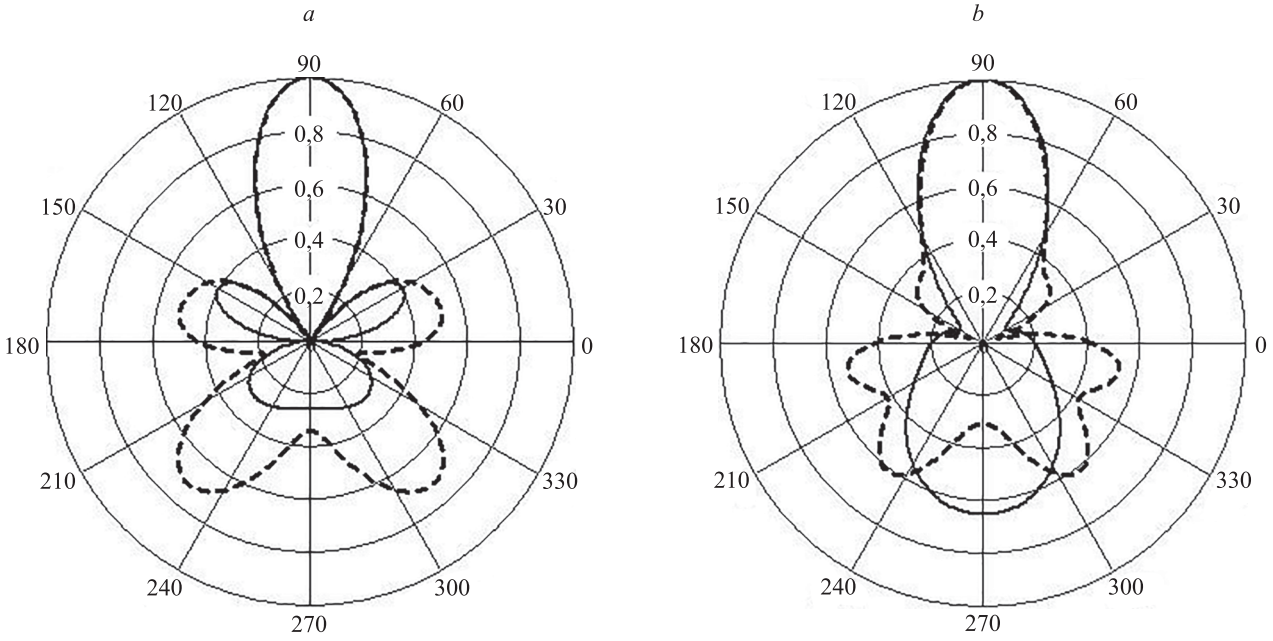



*Рисунок*. Нормированные области, контролируемые системами из $N = 5$ (пунктирная линия) и $N = 15$ (сплошная линия) информационных сенсоров без ограничений (*a*), и при установлении ограничений на дальность действия в $M = 2$ направлениях (*b*)

*Figure*. Normalized areas controlled by systems of $N = 5$ (dashed line) and $N = 15$ (solid line) information sensors without restrictions (*a*) and when setting range limits in $M = 2$ directions (*b*)

Из сравнения зависимостей, приведенных на рисунке, следует, что ограничения $\alpha_m$, $m = 1, 2$, обусловливают возрастание сектора обзора пространства системой из $N = 15$ сенсоров в 1,1 раза при уменьшении дальности действия в направлении $\theta_0 = 90°$ на 15 %. В секторе углов $\theta \in [180°, 360°]$ появляются области энергетической доступности объектов, удаленных от центра системы на расстояние, не превышающее $0{,}65R_{\max}$. В системе из $N = 5$ сенсоров сектор обзора пространства в направлении $\theta_0 = 90°$ увеличивается в 1,15 раза при аналогичном сокращении дальности действия; расстояние, на котором контролируются объекты в секторе углов $\theta \in [180°, 360°]$, увеличивается в 1,52 раза.

В целом за счет реконфигурации системы для исключения направлений на источники помех, нарушающих работу информационных сенсоров, зона ответственности системы мониторинга сужается. Ширина секторного провала функции (1) зависит от числа и плотности размещения информационных сенсоров, количества, угловых координат источников и уровней помех. Для сохранения формы функции (1) требуется минимизировать ее уровни в направлениях, отличных от положений локальных максимумов.

Расширение сектора мониторинга возможно за счет реконфигурации системы с изменением местоположения сенсоров $\mathbf{r}_n$, $n = 1, \ldots, N$, а также увеличения числа информационных сенсоров. Как показано в [14], наибольшая площадь покрытия зоны мониторинга при ограниченном числе информационных сенсоров ($N \geq 5$) достигается за счет их размещения по сотовому принципу – в вершинах равностороннего пятиугольника, центр которого совпадает с центром контролируемой области. При этом СКО оценки местоположения источника радиоизлучения триангуляционным способом возрастает пропорционально дальности до объекта во второй степени и убывает по мере увеличения расстояния между информационными сенсорами. В разностно-дальномерной системе местоопределение точности оценки координат целей снижается по мере увеличения отношения дальности к расстоянию между сенсорами во второй степени [8].

## Оценка эффективности применения пространственно распределенной системы информационных сенсоров для мониторинга обстановки

Эффективность применения пространственно распределенных информационных сенсоров по сравнению с однопозиционными средствами [1, 6] обусловлена расширением возможностей мониторинга за счет получения новых признаков объектов при комплексной обработке данных от различных источников. Комплект пассивных информационных сенсоров, охваченных единым контуром управления с каналами передачи информации для централизованной обработки, обладает функциями определения координат источников сигналов.

Для количественной оценки эффективности мониторинга обстановки найдены экспериментальные значения СКО определения местоположения источников излучений в диапазоне коротких волн пространственно распределенными системами, в которых информационными сенсорами выступали: азимутально-угломестные пеленгаторы, осуществляющие синхронные измерения направлений прихода сигналов в $N = 2$ точках пространства по командам управления с центра сбора и обработки информации; приемники-измерители времени прихода сигналов, расположенные в $N = 5$–6 позициях и программно-управляемые по каналам информационно-телекоммуникационной сети [15].

Местоположение объектов при синхронном пеленговании оценивалось триангуляционным (угломерным) способом и охарактеризованы координатами точек пересечения лучей в направлениях прихода сигналов в позиции приема [8]. По измеренному времени прихода сигналов с помощью пространственно разнесенными приемниками оценивались их задержки в различных точках пространства. В соответствии с разностно-дальномерным способом [8] построены линии положений объектов относительно позиций приемников и вычислены координаты путем нахождения точки пересечения этих линий.

В триангуляционной системе местоопределения применены азимутально-угломестные пеленгаторы с кольцевыми решетками из 16 несимметричных вертикальных активных вибраторов высотой 2,5 м. За счет калибровки антенно-фидерных трактов при настройке на частоту пеленгуемого сигнала и синхронизации радиоприемных устройств при когерентном приеме фазовая неидентичность каналов пеленгаторов не превышала 3°, амплитудная неидентичность составила не более 2 %; при этом инструментальная погрешность измерения угловых координат получена в пределах 0°30′0″ [10].

При проведении измерений в летний период пеленгаторы были размещены в районах с географическими координатами 51°36′57,9″ с.ш. 39°06′43″ в.д. и 60°24′57″ с.ш. 30°28′45″ в.д. на удалении 1000 км; в осенне-зимний период измерения проведены при размещении пеленгаторов в районах с координатами 51°36′57,9″ с.ш. 39°06′43″ в.д. и 47°14′24″ с.ш. 39°42′36″ в.д. при базе угломерной системы 500 км. Геометрические факторы угломерных систем, выбранные из условия достижения наименьшей СКО оценок координат излучателей [8] в зоне мониторинга с границей (1), удовлетворяющей критерию (4.1), характеризовались максимальным значением угла прихода сигналов в азимутальной плоскости 30° и удалением их источников от центра базы от 200 км до 6500 км.

В табл. 1 приведены СКО определения местоположения радиостанций метеоинформации аэродромных сетей в летний период. На радиостанциях использованы сигналы с амплитудной модуляцией и программной перестройкой рабочей частоты. Выбор указанных источников радиоизлучений обусловлен возможностями селекции сигналов на совпадающих частотах в соответствии с временным регламентом работы, что позволяет корректно оценивать СКО выполняемых измерений координат.

Из анализа результатов табл. 1 следует, что точность выполняемых измерений зависит не только от частоты сигнала, но и геометрического фактора угломерной

*Таблица 1*. Точность определения местоположения объектов в летний период

*Table 1.* Accuracy of objects location in summer period

| Номер объекта | Географические координаты объекта | Удаление объекта от центра базы угломерной системы, км | Диапазон рабочих частот объекта, кГц | СКО оценки координат объекта (% от дальности) |
|---|---|---|---|---|
| 1.1 | 51°32′00″ с.ш. 46°00′00″ в.д. | 500 | 1500–4500<br>4500–18000<br>18000–30000 | 65,1<br>51,7<br>44,9 |
| 1.2 | 54°43′00″ с.ш. 20°30′00″ в.д. | 1000 | 1500–4500<br>4500–18000<br>18000–30000 | 24,5<br>2,9<br>2,4 |
| 1.3 | 56°76′07″ с.ш. 60°52′27″ в.д. | 1600 | 1500–4500<br>4500–18000<br>18000–30000 | 37,2<br>3,3<br>2,2 |
| 1.4 | 55°01′00″ с.ш. 82°13′00″ в.д. | 2900 | 1500–4500<br>4500–18000<br>18000–30000 | 14,5<br>5,3<br>4,6 |
| 1.5 | 51°49′26″ с.ш. 107°36′27″ в.д. | 4700 | 1500–4500<br>4500–18000<br>18000–30000 | 14,2<br>5,2<br>4,6 |
| 1.6 | 48°29′00″ с.ш. 135°04′00″ в.д. | 6500 | 1500–4500<br>4500–18000<br>18000–30000 | *<br>6,7<br>— |

*Примечани*е. «*» — условия распространения сигналов в диапазоне частот не позволяют осуществлять их прием в точках размещения пеленгаторов; «—» — оценки местоположения объектов выполняются с аномальными ошибками, обусловленными пространственно-коррелированными помехами сторонних источников и не устраняемыми при выборе конфигурации зоны по критерию (4.1).

системы — от местоположения объекта в зоне мониторинга. При исследовании закономерностей изменения СКО для различного пространственного положения учтем, что зависимости динамических коэффициентов использования сенсоров $a_n$, $n = 1, \ldots, N$, от частоты сигналов, изменяют границы зоны мониторинга в частичных участках диапазона частот. По мере приближения к границе (1) геометрический фактор угломерной системы [8] снижается, что влечет за собой пропорциональное возрастание погрешностей определения местоположения объектов.

Существенные СКО оценок координат объекта № 1.1 связаны с незначительным удалением от центра базы угломерной системы. Углы прихода сигналов к пеленгаторам малы, и геометрический фактор угломерной системы, обратно пропорциональный их значениям [8], даже в направлении нормали к базе пеленгования достаточно велик [10, 16].

Погрешность оценивания координат объекта № 1.2 в диапазоне частот от 1500 до 4500 кГц, составляющая 24,5 % от дальности, превышает значения, достижимые в диапазонах частот от 4500 до 18000 кГц и от 18000 до 30000 кГц в 8,45 раза и 10,2 раза соответственно. Показатели точности определения координат объекта № 1.3 в указанных диапазонах частот различаются в 11,3 раза и 16,9 раза. При различии удалений объектов № 1.2 и № 1.3 от центра базы угломерной системы в 1,6 раза СКО их местоопределения в диапазоне частот от 1500 до 4500 кГц различаются в 1,52 раза, а в диапазонах более высоких частот измерения выполняются практически с одинаковой точностью. Координаты источников радиоизлучений № 1.4 и № 1.5, расположенные на дальностях, различающихся в 1,62 раза, определяются практически с одинаковыми СКО. Погрешность оценки местоположения объекта № 1.6 в диапазоне частот от 4500 до 18000 кГц составляет 7,5 % от дальности и превосходит значения, полученные для источников № 1.4 и № 1.5, в 1,26 и 1,28 раза вследствие смещения направления прихода сигнала в азимутальной плоскости к максимально допустимому значению. При поступлении сигналов под близкими по значениям углами, не превышающими 30°, СКО оценок координат объектов, как показано в [8], возрастает пропорционально отношению дальности до них во второй степени к базе угломерной системы.

В угломерной системе с базой 1000 км на дальности от 1000 до 1500 км определение местоположения источников радиоизлучений в диапазоне частот 1500–4500 кГц выполняется с СКО, превышающей погрешность, характерную для диапазона частот от 18000 до 30000 кГц, в 10,2–16,2 раза. На дальностях от 3000 до 4700 км различие СКО выполняемых измерений составляет 3,1 раза. В диапазоне частот от 18000 до 30000 кГц погрешность оценки координат объектов возрастает в 1,55 раза относительно значений, полученных в диапазоне частот от 4500 до 18000 кГц [10].

В табл. 2 приведены СКО оценок местоположения источников сигналов радиостанций метеоинформации аэродромных сетей с амплитудной модуляцией и программной перестройкой рабочей частоты в осенне-зимний период.

*Таблица 2*. Точность определения местоположения объектов в осенне-зимний период

*Table 2.* Accuracy of objects location in autumn-winter period

| Номер объекта | Географические координаты объекта | Удаление объекта от центра базы угломерной системы, км | Диапазон рабочих частот объекта, кГц | СКО оценки координат объекта (% от дальности) |
|---|---|---|---|---|
| 2.1 | 51°32′00″ с.ш. 46°00′00″ в.д. | 500 | 1500–4500<br>4500–18000<br>18000–30000 | 12,7<br>5,5<br>4,2 |
| 2.2 | 53°12′00″ с.ш. 45°00′00″ в.д. | 600 | 1500–4500<br>4500–18000<br>18000–30000 | —<br>2,8<br>* |
| 2.3 | 53°12′00″ с.ш. 50°06′00″ в.д. | 800 | 1500–4500<br>4500–18000<br>18000–30000 | —<br>3,8<br>* |
| 2.4 | 51°46′00″ с.ш. 55°06′00″ в.д. | 1400 | 1500–4500<br>4500–18000<br>18000–30000 | *<br>4,3<br>* |
| 2.5 | 56°76′07″ с.ш. 60°52′27″ в.д. | 1700 | 1500–4500<br>4500–18000<br>18000–30000 | *<br>7,5<br>* |

*Примечани*е. «*» — условия распространения сигналов в диапазоне частот не позволяют осуществлять их прием в точках размещения пеленгаторов; «—» — оценки местоположения объектов выполняются с аномальными ошибками, обусловленными пространственно-коррелированными помехами сторонних источников и не устраняемыми при выборе конфигурации зоны по критерию (4.1).

Как следует из табл. 2, в угломерной системе с базой 500 км СКО оценки координат объектов на расстоянии до 500 км в диапазонах частот от 1500 до 4500 кГц и от 4500 до 18000 кГц различаются в 2,3 раза; в диапазоне частот от 18000 до 30000 кГц погрешность местоопределения возрастает в 1,55 раза [10].

Программно-управляемые измерители времени прихода сигналов представляют собой диапазонные приемные устройства с программным обеспечением, позволяющим осуществлять многопользовательское управление трансиверами и ресиверами с помощью удаленных компьютеров, подключенных к информационно-телекоммуникационной сети, например, через сервер WebSDR [15].

В процессе мониторинга обстановки дистанционная регулировка параметров приемников, обладающих однозначно идентифицируемыми адресами IP — Internet Protocol, осуществлялась по протоколу TCP/IP — Transmission Control Protocol/Internet Protocol. Синхронизация измерений в системе мониторинга выполнена на основе установления точного времени ответа удаленного сервера. Время задержки сигнала каждого приемника-измерителя в сети определено по результатам зондирования удаленного IP-адреса специальным «эхо-сигналом», представляющим собой пакет ICMP — Internet Control Message Protocol. При этом учтены ошибки синхронизации, зависящие от маршрута прохождения пакета ICMP, что имеет значение для обработки результатов многократных измерений координат объектов.

Для анализа частотно-временных параметров сигналов, принимаемых каждым информационным сенсором, и их обработки в интересах оценки координат объектов в системе мониторинга применены программные пакеты типа LabVIEW, MATLAB/Simulink и GNU RADIO.

По результатам экспериментальных исследований установлено, что оценка местоположения источника сигналов диапазона от 4500 до 18000 кГц с географическими координатами 52°31′00″ с.ш. 2°42′00″ з.д. при использовании комплекта из $N = 6$ приемников, размещенных на дальностях до 1000 км, может быть выполнена с СКО, лежащей в пределах 12–25,1 км. Погрешности местоопределения излучателей с географическими координатами 39°09′00″ с.ш. 116°04′00″ в.д. и 39°54′00″ с.ш. 116°24′00″ в.д. системой из $N = 5$ измерителей времени прихода сигналов, находящихся на удалении 1500–6000 км, составляют 104,1–143,9 км и 101,3–153 км. При увеличении числа измерительных приемников до $N = 6$ СКО оценок координат этих объектов снижаются до 88,9 км и 92,8 км.

Различие СКО оценок координат источников радиоизлучений обусловлено изменением удалений приемников и плотности их размещения в зонах мониторинга. За счет изменения числа и местоположения приемников-измерителей выполнена реконфигурация системы мониторинга, при которой уменьшены флюктуации лучевых траекторий и замирания (фединги) сигналов. В результате получена устойчивость приема сигналов и достижение высоких отношений сигнал-шум при их обработке [10].

При близких по значениям показателях точности измерения времени прихода сигналов в пункты приема СКО оценки местоположения объектов изменены пропорционально удалению от центра измерительной базы [8].

Управление компонентами пространственно распределенной системы мониторинга можно осуществлять с применением алгоритмов структурной и параметрической адаптации и рекуррентной линейной фильтрации результатов измерений параметров сигналов, исходя из требований к эффективности выполнения задач мониторинга обстановки при выбранном местоположении информационных сенсоров.

## Заключение

На основе принципов структурно-информационного анализа обстановки обоснованы пути построения и получены оценки эффективности применения системы пространственно распределенных информационных сенсоров с функциями реконфигурации структуры и изменения состава в соответствии с задачами и условиями мониторинга. С использованием метода неопределенных множителей Лагранжа разработана процедура рационального выбора конфигурации системы сенсоров для контроля заданной зоны пространства. Построение системы мониторинга с охватом заданной зоны заключается в безусловной оптимизации взаимного расположения информационных сенсоров. Выбранные позиции для размещения сенсоров должны обеспечить за счет установления динамических коэффициентов использования наибольшие значения функции, характеризующей совместную пространственную избирательность приема сигналов контролируемых объектов группами из двух сенсоров.

Получены экспериментальные оценки точности определения местоположения объектов в пространственно распределенных системах пассивной радиолокации, функционирующих в диапазоне коротких волн. В эксперименте использованы в качестве информационных сенсоров азимутально-угломестные пеленгаторы для синхронных измерений направлений прихода сигналов в $N = 2$ точках пространства, и приемники-измерители времени прихода сигналов, установленные в $N = 5–6$ точках пространства и программно-управляемые с помощью информационно-телекоммуникационной сети.

Выявлены закономерности снижения среднеквадратических ошибок оценок местоположения объектов за счет выбора числа и позиций информационных сенсоров для обеспечения устойчивости приема сигналов и прироста точности оценивания направления и времени их прихода в различные точки пространства вследствие малых энергетических потерь на трассах распространения.

## Литература


1. Куприянов А.И., Сахаров А.В. Теоретические основы радиоэлектронной борьбы: учебное пособие. М.: Вузовская книга, 2007. 356 с.
2. Kostylev V.I., Slichenko M.P. Energy detection of partially polarized radio signals against the background of gaussian noise // Radio-Physics and Quantum Electronics. 2011. V. 53. N 12. P. 721–731. https://doi.org/10.1007/s11141-011-9265-9
3. Trifonov A.P., Korchagin Y.E., Chernoyarov O.V., Shakhtarin B.I. Detection of radio signals that appear and disappear at unknown moments // Journal of Communications Technology and Electronics. 2015. V. 60. N 4. P. 375–385. https://doi.org/10.1134/S1064226915040130
4. Kochkarov A.A., Razin'kov S.N., Timoshenko A.V., Shevtsov V.A. Comprehensive method of information resources control ensuring the security of telecommunication systems of aviation monitoring complexes // Russian Aeronautics. 2020. V. 63. N 2. P. 347–356. https://doi.org/10.3103/s1068799820020233
5. Меньшаков Ю.К. Теоретические основы технических разведок: учебное пособие. М.: МГТУ имени Н.Э. Баумана, 2008. 536 с.
6. Радзиевский В.Г., Сирота А.А. Теоретические основы радиоэлектронной разведки. М.: Радиотехника, 2004. 432 с.
7. Pieraccini M., Miccinesi L., Rojhani N. RCS Measurements and ISAR images of small UAVs // IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine. 2017. V. 32. N 9. P. 28–32. https://doi.org/10.1109/MAES.2017.160167
8. Кондратьев В.С., Котов А.Ф., Марков Л.Н. Многопозиционные радиотехнические системы / под ред. В.В. Цветнова. М.: Радио и связь, 1986. 264 с.
9. White W.D. Low-angle radar tracking in the presence of multipath // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 1974. V. AES-10. N 6. P. 835–852. https://doi.org/10.1109/TAES.1974.307892
10. Razinkov S.N., Reshetnyak E.A., Zhidko E.A. Measurement of the coordinates of radio emission at high frequencies by goniometric and goniometric-range finding methods // Measurement Techniques. 2020. V. 62. N 12. P. 1056–1063. https://doi.org/10.1007/s11018-020-01734-y
11. Гуров Г.Б., Поздышев В.Ю., Тимошенко А.В., Разинькова О.Э. Идентификация маневрирующих объектов при структурно-си-


## References


1. Kupriianov A.I., Sakharov A.V. *Theoretical Background of the Radioelectronic Warfare*. Tutorial. Moscow, Vuzovskaja kniga Publ., 2007, 356 p. (in Russian)
2. Kostylev V.I., Slichenko M.P. Energy detection of partially polarized radio signals against the background of gaussian noise. *Radio-Physics and Quantum Electronics*, 2011, vol. 53, no. 12, pp. 721–731. https://doi.org/10.1007/s11141-011-9265-9
3. Trifonov A.P., Korchagin Y.E., Chernoyarov O.V., Shakhtarin B.I. Detection of radio signals that appear and disappear at unknown moments. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2015, vol. 60, no. 4, pp. 375–385. https://doi.org/10.1134/S1064226915040130
4. Kochkarov A.A., Razin'kov S.N., Timoshenko A.V., Shevtsov V.A. Comprehensive method of information resources control ensuring the security of telecommunication systems of aviation monitoring complexes. *Russian Aeronautics*, 2020, vol. 63, no. 2, pp. 347–356. https://doi.org/10.3103/s1068799820020233
5. Menshakov Iu.K. *Theoretical Background of the Technical Reconnaissance*. Tutorial. Moscow, Bauman Moscow State Technical University, 2008, 536 p. (in Russian)
6. Radzievskii V.G., Sirota A.A. *Theoretical Background of the Electronic Reconnaissance*. Moscow, Radiotehnika Publ., 2004, 432 p. (in Russian)
7. Pieraccini M., Miccinesi L., Rojhani N. RCS Measurements and ISAR images of small UAVs. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2017, vol. 32, no. 9, pp. 28–32. https://doi.org/10.1109/MAES.2017.160167
8. Kondratev V.S., Kotov A.F., Markov L.N. *Multi-Position Radio Engineering Systems*. Moscow, Radio i svjaz' Publ., 1986, 264 p. (in Russian)
9. White W.D. Low-angle radar tracking in the presence of multipath. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1974, vol. AES-10, no. 6, pp. 835–852. https://doi.org/10.1109/TAES.1974.307892
10. Razinkov S.N., Reshetnyak E.A., Zhidko E.A. Measurement of the coordinates of radio emission at high frequencies by goniometric and goniometric-range finding methods. *Measurement Techniques*, 2020, vol. 62, no. 12, pp. 1056–1063. https://doi.org/10.1007/s11018-020-01734-y

стемном контроле воздушного пространства // Вычислительные технологии. 2021. Т. 26. № 4. С. 16–26. https://doi.org/10.25743/ICT.2021.26.4.003
12. Бахтин В.И., Иванишко И.А., Лебедев А.В., Пиндрик О.И. Метод множителей Лагранжа. Минск: БГУ, 2012. 40 с.
13. Barton D.K. Modern Radar System Analysis. Norwood, Mass.: Artech House, 1988. 388 p.
14. Агафонов Л.К. Элементы математического описания структуры сотовых систем подвижной радиосвязи // Средства связи. 1991. № 2. С. 28–32.
15. Львов А.В., Мителькова А.Д., Кабаев Д.В., Стародубровский А.С. Разработка и прототипирование радиоэлектронных устройств по технологии SDR с использованием системы GNU RADIO // Сборник трудов XXIV Международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь» Т. 2. Воронеж: ВГУ, 2018. С. 228–234.
16. Zhidko E.A., Razin'kov S.N. Methods for determining the angular coordinates and locations of radio sources in unmanned monitoring systems and experimental estimates of the accuracy of these parameters // Measurement Techniques. 2020. V. 62. N 10. P. 893–899. https://doi.org/10.1007/s11018-020-01710-6

11. Gurov G.B., Pozdyshev V.Y., Timoshenko A.V., Razinkova O.E. Identification of maneuvering objects during structural and system control of airspace. *Journal of Computational Technologies*, 2021, vol. 26, no. 4, pp. 16–26. (in Russian). https://doi.org/10.25743/ICT.2021.26.4.003
12. Bakhtin V.I., Ivanishko I.A., Lebedev A.V., Pindrik O.I. *Method of the Lagrange Multipliers*. Minsk, BSU, 2012, 40 p. (in Russian)
13. Barton D.K. Modern Radar System Analysis. Norwood, Mass., Artech House, 1988, 388 p.
14. Agafonov L.K. Elements of the Mathematical Description of the Cellular Systems Structures for Mobile Radio Communications. *Sredstva svjazi*, 1991, no. 2, pp. 28–32. (in Russian)
15. Lvov A.V., Mitelkova A.D., Kabaev D.V., Starodubrovsky A.S. Development and prototyping of SDR radio systems using the GNU RADIO toolkit. *Proc. of the XXIV International Conference "Radar Ranging, Navigation, and Communications"*. Vol. 2. Voronezh, Voronezh State University, 2018, pp. 228–234. (in Russian)
16. Zhidko E.A., Razin'kov S.N. Methods for determining the angular coordinates and locations of radio sources in unmanned monitoring systems and experimental estimates of the accuracy of these parameters. *Measurement Techniques*, 2020, vol. 62, no. 10, pp. 893–899. https://doi.org/10.1007/s11018-020-01710-6

## Авторы

**Зюзин Алексей Владимирович** — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой, Ярославское высшее военное училище противовоздушной обороны, Ярославль, 150001, Российская Федерация, https://orcid.org/0000-0002-8315-0586, aleksey.zyuzin@mail.ru

**Кныш Марина Владимировна** — кандидат физико-математических наук, доцент, Ярославское высшее военное училище противовоздушной обороны, Ярославль, 150001, Российская Федерация, https://orcid.org/0000-0002-2674-9074, mariku2713@mail.ru

**Разиньков Сергей Николаевич** — доктор физико-математических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», Воронеж, 394065, Российская Федерация, SC 57203497154, https://orcid.org/0000-0002-3987-0607, razinkovsergey@rambler.ru

**Тимошенко Александр Васильевич** — доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, 125993, Российская Федерация, SC 57216758183, https://orcid.org/0000-0002-9791-142X, u567ku78@gmail.com

## Authors

**Alexey V. Zyuzin** — D. Sc. (Eng.), Professor, Head of Department, Yaroslavl Higher Military School of Air Defense, Yaroslavl, 150001, Russian Federation, https://orcid.org/0000-0002-8315-0586, aleksey.zyuzin@mail.ru

**Marina V. Knysh** — PhD (Physics & Mathematics), Associate Professor, Yaroslavl Higher Military School of Air Defense, Yaroslavl, 150001, Russian Federation, https://orcid.org/0000-0002-2674-9074, mariku2713@mail.ru

**Sergey N. Razinkov** — D. Sc. (Physics & Mathematics), Associate Professor, Leading Researcher, Air Force Education and Research Center "The Zhukovsky — Gagarin Air Force Academy", Voronezh, 394065, Russian Federation, SC 57203497154, https://orcid.org/0000-0002-3987-0607, razinkovsergey@rambler.ru

**Alexander V. Tymoshenko** — D. Sc. (Eng.), Professor, Leading Researcher, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, 125993, Russian Federation, SC 57216758183, https://orcid.org/0000-0002-9791-142X, u567ku78@gmail.com

*Статья поступила в редакцию 21.12.2021*
*Одобрена после рецензирования 05.04.2022*
*Принята к печати 19.05.2022*

*Received 21.12.2021*
*Approved after reviewing 05.04.2022*
*Accepted 19.05.2022*

Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ
май–июнь 2022 Том 22 № 3 http://ntv.ifmo.ru/
SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL OF INFORMATION TECHNOLOGIES, MECHANICS AND OPTICS
May–June 2022 Vol. 22 No 3 http://ntv.ifmo.ru/en/
ISSN 2226-1494 (print) ISSN 2500-0373 (online)
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК УНИВЕРСИТЕТ ИТМО
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ

doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-3-610-622

# Monitoring of infiltration processes in hydraulic structures using distributed acoustic sensing technology

**Andrey V. Timofeev[1]✉, Denis I. Groznov[2]**

[1,2] EqualiZoom LLP, Nur-Sultan, 010000, Kazakhstan

[1] timofeev.andrey@gmail.com✉, https://orcid.org/0000-0001-7212-5230
[2] d.i.groznov@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0002-7874-7118

**Abstract**

The article proposes a new method of monitoring the infiltration processes developing inside the body of hydraulic structures. The method is based on the use of DAS (distributed acoustic sensing) fiber-optic technology which provides high spatial continuity of hydraulic structure seismoacoustic field analysis; digital twin infiltration dynamics and efficient signal processing methods based on machine learning. As a distributed sensor of the object's seismoacoustic field, a DAS system is used the fiber-optic sensor of which is installed inside the body of the structure according to the principle of maximum coverage. The infiltration activity inside the structure body is estimated based on the analysis of an infiltration flows ensemble which are detected and classified by machine learning (ML) methods. These infiltration flows are sources of seismoacoustic emission and are therefore confidently detected by the DAS system. A digital twin of the infiltration dynamics based on the equations of mathematical physics is used as the normal basis for estimating the current state of fluid activity in the body of the structure. The risk of a structure failure under the influence of the observed infiltration flow is estimated within the framework of the proposed formal method based on the digital twin data. Based on the analysis of Data Set, consisting of real signals of infiltration processes, the high efficiency of detection and classification of this type of signals with the special ML-classifier included in the monitoring system is proved. A digital twin model of the infiltration processes dynamics in the body of a hydraulic structure is proposed. On the basis of the digital twin model, a method for estimating the risk of damage to the body of a hydraulic structure, which may occur as a result of the observed infiltration activity, is proposed. The method of controlling infiltration processes inside hydraulic structures can be used to monitor the operational condition of almost any hydraulic structures, including those in the cryolithic zone.

**Keywords**

DAS, infiltration process, machine learning, classification, hydraulic structures, tailings monitoring, dam monitoring, SVM, digital twin, cryolithozone, Darcy's equation

**For citation:** Timofeev A.V., Groznov D.I. Monitoring of infiltration processes in hydraulic structures using distributed acoustic sensing technology. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2022, vol. 22, no. 3, pp. 610–622. doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-3-610-622

УДК 004.852

# Мониторинг инфильтрационных процессов в гидротехнических сооружениях с использованием распределенного акустического сенсора

**Андрей Владимирович Тимофеев[1]✉, Денис Игоревич Грознов[2]**

[1,2] ТОО «Эквалайзум», Астана, 010000, Казахстан

[1] timofeev.andrey@gmail.com✉, https://orcid.org/0000-0001-7212-5230
[2] d.i.groznov@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0002-7874-7118

**Аннотация**

**Предмет исследования.** Предложен новый метод мониторинга инфильтрационных процессов, развивающихся внутри тела гидротехнических сооружений. Метод основан на использовании оптоволоконной технологии DAS (distributed acoustic sensing). Данная технология обеспечивает высокую пространственную сплошность анализа сейсмоакустического поля сооружения; цифрового двойника динамики инфильтрационных

© Timofeev A.V., Groznov D.I., 2022

процессов и эффективных методов обработки сигналов, основанных на машинном обучении (machine learning — ML). **Метод.** В качестве распределенного сенсора сейсмоакустического поля объекта использована DAS-система, оптоволоконный сенсор которой инсталлирован внутри тела сооружения по принципу максимального охвата. Инфильтрационная активность внутри тела сооружения оценена по совокупности обнаруженных и классифицированных методами машинного обучения инфильтрационных потоков, которые являются источниками сейсмоакустической эмиссии и поэтому уверенно детектируются DAS-системой. Цифровой двойник динамики инфильтрационных процессов, основанный на уравнениях математической физики, использован в качестве нормальной базы при оценке текущего состояния активности флюидов в теле сооружения. Риск разрушения сооружения под воздействием инфильтрационного потока оценен в рамках предложенного, формального метода, основанного на полученных данных цифрового двойника. **Основные результаты.** На основании анализа базы данных сигналов, состоящей из реальных сигналов инфильтрационных процессов, доказана высокая эффективность детекции и классификации сигналов данного типа при помощи ML-классификатора, входящего в состав системы мониторинга. Предложен цифровой двойник динамики инфильтрационных процессов в теле гидросооружения. На основе использования этой модели предложен метод оценки риска повреждения тела гидротехнического сооружения, которое может произойти в результате реализовавшейся инфильтрационной активности. **Практическая значимость.** Метод контроля инфильтрационных процессов внутри гидротехнических сооружений может быть использован для мониторинга оперативного состояния практически любых гидротехнических сооружений, в том числе в криолитозоне.

**Ключевые слова**

DAS, инфильтрационный процесс, машинное обучение, классификация, гидротехническое сооружение, мониторинг хвостохранилищ, мониторинг дамб, SVM, цифровой двойник, криолитозона, уравнение Дарси

**Ссылка для цитирования:** Тимофеев А.В., Грознов Д.И. Мониторинг инфильтрационных процессов в гидротехнических сооружениях с использованием распределенного акустического сенсора // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2022. Т. 22, № 3. С. 610–622 (на англ. яз.). doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-3-610-622

## Introduction

The task of early detection of infiltration processes places intensification and formation of enlarged filtration jets (pipes) is one of the central tasks in the set of hydraulic structures monitoring [1]. The importance of intensity control of infiltration processes is due to the practice of operation of hydraulic structures which indicates that in most cases the cause of accidents is the impact of uncontrolled filtration flow in the foundation and in the body of the hydraulic structure (for example — in the body of the embankment dam). Due to climate change, the problem of timely detection of localized infiltration activity has become more important for hydraulic structures located in the cryolithic zone. For example, it is fair for numerous tailings dams. Tailings storage facility is a hydraulic structure designed to store mineral processing waste (tailings). Tailings come to the tailings pond in the form of slurry. There is a widespread opinion among hydraulic engineering specialists that a significant part of emergency situations at hydrostructures, in particular in the body of embankment dams, could be avoided if the relevant services had adequate, timely information about infiltration processes that take place in the body and in the foundation of hydrostructures [1, 2]. Of course, an adequate response to changes in the status of infiltration activity in the body of a hydraulic structure is possible only if there is an objective methodology designed to promptly assess the risk of destruction of a bulk hydraulic structure under the influence of infiltration processes occurring in its body. The present work is devoted to creating the foundation for such a methodology based on the data of continuous control of infiltration processes in the hydraulic structure body.

Filtration (infiltration) is the movement of fluids (liquid, gas, or carbonated liquid) in a porous medium [3]. In hydraulic engineering, water is considered as a fluid, and the media formed from soils, fractured rocks, concrete and other porous materials is considered as a porous medium. Since the porous structure has a fundamentally stochastic structure, hydraulic engineering considers the averaged parameters of filtration properties of the porous medium, in particular, filtration rate, filtration head, head gradient, filtration coefficient, and others. All these characteristics, to one extent or another, characterize the intensity of infiltration processes. It is assumed that during filtration the fluid moves inside the porous body, gradually filling all the space available to it: pores and soil particles. In this case, the fluid flow through any site should be equal to its real flow rate. De facto it is assumed that real fluid flow in pores of ground is replaced by some “fictitious” filtration flow of the same fluid continuously filling volumes.

Fig. 1 shows in schematic form three variants of infiltration activity state in the body of tailings dam embankment. The Fig. 1, *a* corresponds to the normal situation: infiltration process is represented in the form of local jets of small diameter which develop significantly below the level of the calculated depression curve. The Fig. 1, *b* corresponds to the situation when the intensity of the infiltration process increases to pre-critical: the thickness of jets becomes larger and their location may be above the calculated depression curve, and the actual depression curve rises. The Fig. 1, *c* illustrates a critical case: infiltration jets integrated into a large “tube” (micro-river), the dam is at critical risk. Here the depression curve has risen to a critical level; in fact, almost the entire body of the dam is covered by the infiltration process.

The existing methods of controlling infiltration processes are based on the use of point measurements which were obtained by means of piezometers placed at certain points of the body of the hydraulic structure and forming a piezometric network. However, this method has significant disadvantages, the main of which is the

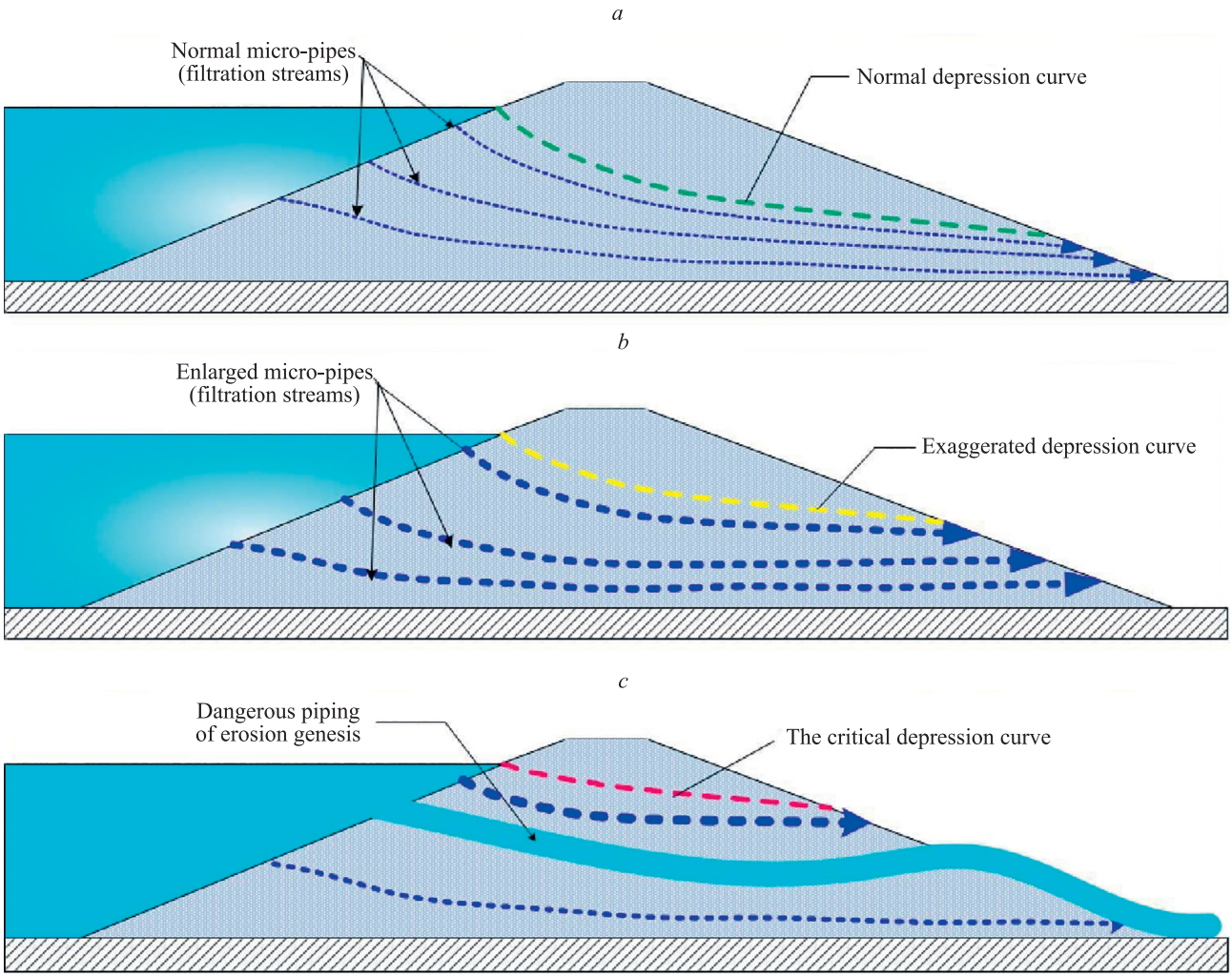



*Fig. 1*. Stages of infiltration process progression inside the dam body: normal situation (*a*); infiltration increasing, pre-critical situation (*b*); maximum infiltration process development, critical situation (*c*)

impossibility of controlling infiltration in areas that are not within the control zone of the piezometric network. The fact is that the practice of operation of bulk tailings dams in the cryolithic zone has shown that intensive fluid infiltration can take place in very narrow in diameter areas of the dam body. In some cases, the intensification of infiltration occurs literally in the areas of 1–2 m in size, while the piezometer placement step is usually significantly higher (literally by orders of magnitude) than this value.

In order to level out this disadvantage of the tailings monitoring system, it is reasonable to use sensor networks with greater coverage continuity. At the same time, to reduce the piezometric network step is extremely costly from the economic point of view. Under these conditions, the use of fiber-optic sensor technologies of DAS (distributed acoustic sensing, [4–8]), which are used either as a supplement to the conventional piezometer network or instead of it, looks attractive. The fiber-optic sensor DAS monitoring system is placed inside the dam body in such a way as to maximize the area of seismoacoustic emission field control of the dam body. Particular attention, in this case, is paid to critical areas the location of which is determined at the stage of structural design. Since infiltration processes, due to their own physical nature, are quite powerful seismoacoustic emission sources (SES), DAS monitoring system allows you to effectively monitor the places of occurrence and development of SES of this type inside the dam body for rapid assessment of their power and size, as well as to assess the intensity of infiltration processes in general. The DAS monitoring system can monitor almost the entire body of the dam if the fiber-optic sensor is properly installed. Fig. 2 shows a schematic representation of the DAS monitoring system installation in the body of a bulk tailings dam. Here FOS – fiber-optic sensor located inside the dam body.

In this paper, the focus is on the infiltration processes monitoring in the tailings dam embankment body, so the examples and illustrations will refer to this particular case. At the same time, the proposed methodology of control is universal and therefore can be used to control the infiltration dynamics of hydraulic structures of other types.

The contribution of this paper is given below.

— A digital twin of the infiltration processes dynamics in the body of the hydro-technical monitoring structure is proposed.
— On the basis of this model, a method of risk assessment of a hydraulic structure failure under the infiltration

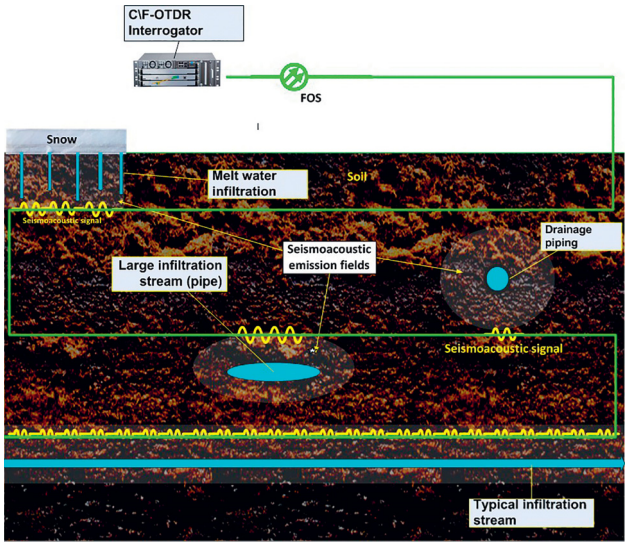



*Fig. 2*. Installation scheme of DAS monitoring system in the tailings dam body.
Here C\F-OTDR is Coherent/Phase-Sensitive Optical Time Domain Reflectometer

process dynamics, which was promptly observed by means of DAS systems, is proposed.

— We propose a ML-classifier (machine learning based classifier) designed for selection (detection and classification) of infiltration activities based on their seismoacoustic signatures and which functions on the basis of the original feature space. High efficiency of this ML-classifier is proved by its testing on the specialized Data Set. In particular, the performance of the ML-classifier in the situation when seismoacoustic signals from the target infiltration assets are received in the mixture with seismoacoustic signals of non-target nature is proved.

## Related Work

In recent years, interest in the use of DAS systems for monitoring hydraulic structures has increased: several companies offer DAS as a component of the monitoring system of hydraulic structures, including tailings. We are talking about the companies “Silixa”, “Field Electronics”, “Terra15”, “Luna Innovations”, which in 2020 acquired the oldest player in the DAS market the company “OptaSense”, and “Institute of Mine Seismology”. At the same time, there are relatively few scientific publications on this topic. The exceptions are the papers [9–13].

The paper [9] provides general information about fiber-optic monitoring, gives a brief overview of related technologies. The disadvantages of this work include the lack of a description of the mathematical support of the system which makes it impossible to assess its capabilities. The methods of sensor installation presented in the text of this article seem to be very controversial, because they involve placing the sensor not in the body of the building, but on its surface. A very informative review [10] is devoted to the use of DAS systems for monitoring infiltration processes in hydraulic structures within the Ambient Noise Interferometry (ANI) methodology [14]. In contrast to [9], the sensor installation scheme presented in this paper is more plausible and corresponds to the principle of maximum coverage. This paper focuses not only on DAS technology, but also on other fiber-optic techniques, including fiber-optic technology for temperature measurement based on the use of Brillouin–Mandelstam radiation and Distributes Strain Sensing. The focus is on the use of ANI with DAS measurements to obtain a 3D image of the dike body. It is known that ANI makes use of naturally occurring and anthropogenic background noise to calculate seismic velocities and hence image the subsurface [14]. Here the idea is used that the background seismic noise passes through the subsurface of the structure in the same way as the signal emitted by an active (artificial) sounding source. Therefore, by studying the propagation of signals from background seismoacoustic sources, it is possible to obtain the same information that can be obtained from active sounding. DAS is used as a sensing system. In [10] the use of a digital twin of the infiltration processes dynamics in the body of the structure is not mentioned, also there is no information on how the built 3D model of the dam body will be used to assess the current state of the structure (no risk assessment methodology is given). Also there is no information about the effectiveness of mathematical support of the system in solving the problem of selection (detection and identification) of target signals from infiltration processes. It should be remembered that the target signals can be quite weak and are always received in a mixture with interfering signals. Therefore, the methods for solving the problem of selection of these signals are very important. In fact, almost the entire paper [10] is devoted to the peculiarities of cross-channel data processing of the DAS system, which is implemented to estimate local sound propagation velocities in the dam body, as well as the details of building a 3D image of the dam body. Work [11] is a brief comparative review of technical capabilities of monitoring hardware, including DAS. In [12], in addition to general technical information about OptaSense DAS interrogator, an adequate scheme of sensor installation in the dam body is proposed.

In contrast to the papers mentioned above, the method proposed in the present work to include DAS system in the monitoring loop of infiltration processes of a hydraulic structure body has a system basis. In this case, the data coming from DAS system is analyzed in order to directly assess the risk of structural failure which brings a deviation of the observed infiltration processes from the norm. The norm is defined by the parameters of the digital twin which describes the normal dynamics of infiltration processes. In addition, this paper details a new technique for highly efficient infiltration signals recognition. This technology is based on machine learning and is designed to recognize signals from infiltration processes in the body of the structure under conditions where signals are received by the DAS system in a mixture with non-target signals of a different nature and which should not be taken into account in the risk analysis.

## Objectives and Method

The objectives of this work are:

— Creation of a digital twin model of infiltration processes (DTIP) developing inside the hydraulic structure body.

— Development of a methodology designed for operational assessment of the damage risk of hydraulic structures under the influence of infiltration processes developing within the structure body. The methodology is based on the simultaneous use of DTIP and operational fluid migration monitoring data in the hydraulic structure body. These data are obtained through the use of the DAS monitoring system.

— Development of ML-classifier based on the use of original feature space and modern methods of machine learning to solve the problem of infiltration activity signal detection and classification.

Let's denote:

— $X \subseteq R^3$ is a set of coordinate points of a hydraulic structure;

— $\mathbf{h}(\mathbf{x}) = (h(<\mathbf{x}>_1), h(<\mathbf{x}>_2), h(<\mathbf{x}>_3))$ is the vector of the fluid head at the point $\mathbf{x} \in X$;

— $\nabla^T\mathbf{h}(\mathbf{x}) = \left(\frac{\partial h(\mathbf{x})}{\partial x}, \frac{\partial h(\mathbf{x})}{\partial y}, \frac{\partial h(\mathbf{x})}{\partial z}\right)$ is fluid head gradient $\mathbf{h}(\mathbf{x})$;

— $K(\mathbf{x}) = (k_x(\mathbf{x}), k_y(\mathbf{x}), k_z(\mathbf{x}))$ is three-dimensional vector of permeability coefficients which characterizes the volumetric permeability of the porous medium at the point $\mathbf{x}$.

The movement of groundwater, according to the laws of fundamental continuum mechanics, obeys the Darcy's equation [14], which can be written in the following form:

$$\mathbf{v}(\mathbf{x}) = -K(\mathbf{x})\cdot\nabla^T\mathbf{h}(\mathbf{x}),$$

where $\mathbf{v}(\mathbf{x})$ is the fluid filtration rate at point $\mathbf{x}$. From the concepts of hydraulics, it is easy to obtain the basic differential equation for the steady-state fluid flow:

$$K(\mathbf{x})\cdot\mathbf{H}_\mathbf{h}{}^T(\mathbf{x}) = 0, \quad (1)$$

where $\mathbf{H}_\mathbf{h}(\mathbf{x})$ is hessian fluid head $\mathbf{h}(\mathbf{x})$. Equation (1) is solved numerically, and the result is an estimate of the piezometric head function $\mathbf{h}^E(\mathbf{x})$ and gradient estimation $\mathbf{h}^E(\mathbf{x})$ in the form of $\nabla^E\mathbf{h}(\mathbf{x})$. From Darcy's equation we get:

$$\mathrm{v}^{(E)}(\mathbf{x}) = -K(\mathbf{x})\cdot(\nabla^E\mathbf{h}(\mathbf{x}))^T. \quad (2)$$

Equation (2) describes the procedure of obtaining a numerical estimate $\mathrm{v}^{(E)}(\mathbf{x})$ for the infiltration rate at the point $\mathbf{x}$. In fact, (2) is the mathematical basis of the DTIP. Based on (2), uniformly over the entire body of the structure, a map of normal infiltration flow rates is calculated; this is used as the basis for assessing the current state of infiltration activity. In fact, DTIP is the following set:

$$\mathrm{DTIP} = \{\mathrm{v}^{(E)}(\mathbf{x})|\mathbf{x} \in X\}.$$

DTIP is determined as a result of numerical modeling of infiltration processes in the hydraulic structure body using one of the platforms for multiphysics modeling of hydrodynamic processes by finite element method, taking into account stress and strain in the ground. Such modeling can be implemented, for example, on the PLAXIS platform[1].

The principle of DAS system functioning, otherwise called C\F-OTDR system, [4–8] involves measuring the distributed strain rate of the optical fiber of the fiber optic cable which is caused by oscillatory pressure changes on the sensor surface. This oscillatory pressure is associated either with the impact of seismoacoustic waves or with the impact of a fluid that flows over the surface of the fiber optic cable [6]. The mechanism of fluid impact on the sensor surface is schematically shown in Fig. 3.

Numerous observations, some of which are described in this paper, have shown that the effect of the fluid on the fiber-optic sensor is oscillatory in nature. It is important that the period duration of the dominant harmonic of these oscillations does not exceed the value of 3–5 s. On the other hand, tests [6] showed a linear dependence between the DAS strain gradient and the fluid pressure gradient for short periods of oscillations (less than 10 s). According to the principle of its device [5–9], the DAS system is able to measure some scalar parameter which informatively characterizes the generalized deformation rate of the optical sensor (averaged over a certain time interval, $T$). Based on the above, the estimate $\mathrm{v}^{(R)}(\mathbf{x})$ of the real fluid infiltration rate, measured at point $\mathbf{x}$ with the DAS system, is approximated by the following linear relationship:

$$\mathrm{v}^{(R)}(\mathbf{x}) = \Phi(\mu)\cdot D(\mathbf{x}|T)\ . \quad (3)$$

[1] PLAXIS Geotechnical Analysis Software: URL: https://www.bentley.com/en/products/brands/plaxis (accessed: 19.01.2022).

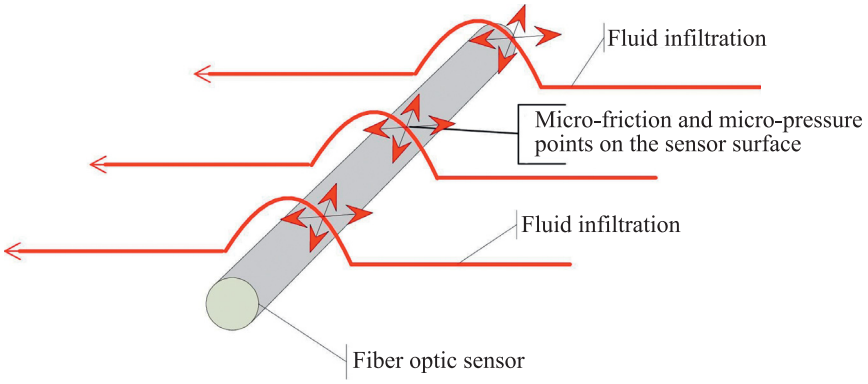



*Fig. 3*. Fluid impact on the surface of the fiber optic sensor

Here $\Phi(\mu)$ is a scalar calibration function that depends on the type of soil $\mu$, which is determined as a result of in-situ experiments.

For an arbitrary point $\mathbf{x} \in X$, let us represent the value of the relative deviation of the infiltration rate from the calculated value in the following form

$$\Delta_{ER}(\mathbf{x}) = 100 \cdot (v^{(E)}(\mathbf{x}) - v^{(R)}(\mathbf{x}))/v^{(E)}(\mathbf{x}) .$$

Let's denote: $\mathbf{\Delta}_{ER}{}^{X}$ — matrix of relative mismatches $v^{(E)}(\mathbf{x})$ and $v^{(R)}(\mathbf{x})$ all over $X$,

$$\forall \mathbf{x} \in X : \mathbf{\Delta}_{ER}^{X}(\mathbf{x}) = \Delta_{ER}(\mathbf{x}).$$

According to the essence of the strength calculation inherent in the design of the hydraulic structure, the most stable state of the structure corresponds to the situation when $\forall \mathbf{x} \in X : \Delta_{ER}(\mathbf{x}) = 0$. Thus, if in all $\mathbf{x} \in X$ the value of $\Delta_{ER}(\mathbf{x}) = 0$, then the infiltration processes in the structure body are not out of control and therefore the risk of destruction of the structure, due to the impact of infiltration processes, is considered to be minimal. Conversely, the more the value $\Delta_{ER}(\mathbf{x})$ differs from zero, the higher the risk of infiltration processes getting out of control at least at point $\mathbf{x} \in X$.

At the stage of hydraulic structure calculation, a scalar loss function $L(\Delta|\mathbf{x})$ is determined, which indicates a potential damage that the structure will incur in the event of infiltration failure of this structure body at point $\mathbf{x} \in X$, at the value of the relative deviation of the infiltration processes rate from the calculated value by $\Delta$ (measured in percent). The $L(\Delta|\mathbf{x})$ function can be assigned by expert methods or determined as a result of strength calculations. In the simplest case, the loss function $L(\Delta|\mathbf{x})$ can have a point type and take values from a finite score set of small power (no more than 10). Also at the stage of calculation, the function $\rho(\Delta(\mathbf{x}))$ is determined which describes an approximate value of the probability density for the event $\omega_F$: "the relative deviation of the infiltration process rate from the calculated value by the value $\Delta(x)$ (%)". Since in practice the density function $\rho(\Delta(\mathbf{x}))$ is unknown, for the purpose of risk assessment it is reasonable to use an approximation of this function, for example, "nuclear": $\rho^*(\Delta(\mathbf{x}))$. This approximation has the following properties: $\rho^*(x)$ is a continuous bell-shaped function, positive over the whole definition area, $\rho^*(x) = \rho^*(-x)$, $\int_X (\rho^*(x))^2 dx < \infty$, $\sup_x |\rho^*(x)| < \infty$, $\int_{-\infty}^{\infty} \rho^*(x) = 1$. All these conditions are satisfied by the classical Gaussoid: $\rho_G^*(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right)$.

In addition, consider the value $P(\Delta(\mathbf{x})|a_x)$ — the probability of the event $\omega_H$: "the occurrence of a fracture zone at point $\mathbf{x}$ if the value of the relative deviation of the infiltration process rate from the calculated value equal $\Delta(\mathbf{x})$ (%)". In the general case, $P(\Delta(\mathbf{x})|a_x)$ increases monotonically with the growth of $|\Delta(\mathbf{x})|$, and the nature of the monotonicity is determined by the strength properties of the hydraulic structure body at point $\mathbf{x}$. Practically, the following approximation is appropriate: $P(\Delta(\mathbf{x})|a_x) = 1 - a_x \cdot (\Delta(\mathbf{x}) + a_x)^{-1}$ (Fig. 4). The value of the parameter $a_x$ determines the rate of increase of $P(\Delta(\mathbf{x})|a_x)$ and depends on the hydraulic

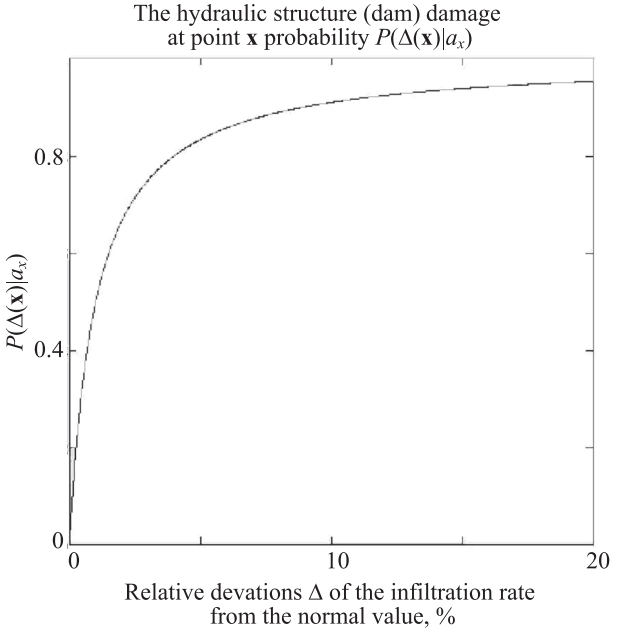



*Fig. 4*. Function $P(\Delta(\mathbf{x})|a_x)$

permeability and strength of the structure material in the vicinity of point $\mathbf{x}$.

Consider the assessment of the risk of hydraulic structure failure under the influence of infiltration processes, which develop in the structure body under the observed matrix $\mathbf{\Delta}_{ER}{}^{X}$, in the following form:

$$R(\mathbf{\Delta}_{ER}^{X}) = \int_X P_c(\mathbf{x}) \cdot L(\Delta_{ER}(\mathbf{x})) \cdot \rho_G^*(\Delta_{ER}(\mathbf{x})) d\mathbf{x} + \int_X P_c(\mathbf{x}) \cdot \chi(\Delta_{ER}(\mathbf{x})|p, C) \cdot P(\Delta(\mathbf{x})|a_x) d\mathbf{x} . \quad (4)$$

In (4) the following notations are used:

— $\chi(\Delta_{ER}(\mathbf{x})|p, C) = \begin{cases} \Delta_{ER}(\mathbf{x}) < p, 0 \\ \Delta_{ER}(\mathbf{x}) \geq p, C \end{cases}$;

— parameters $p$ (threshold) and $C$ (penalty for exceeding the threshold) are selected as a result of numerical modeling of infiltration processes in the hydraulic structure body, in the process of DTIP creation;

— $P_c(\mathbf{x})$ is the probability of detection by the monitoring system of the infiltration process that develops at point $\mathbf{x}$. In fact, we are talking about the detection of precursors of the creation of conditions for the beginning of a destructive process at point $\mathbf{x}$. The method for estimating this parameter is given in the next section of the article.

In (4), component $\int_X P_c(\mathbf{x}) \cdot L(\Delta_{ER}(\mathbf{x})) \cdot \rho_G^*(\Delta_{ER}(\mathbf{x})) d\mathbf{x}$ corresponds to the conservative (stable) scenario of the infiltration processes dynamics in the hydraulic structure body. Within this scenario, possible deviations of infiltration rate from the calculated values are steadily rare, and the risks of destruction of the structure are manageable. On the other hand, component $\int_X P_c(\mathbf{x}) \cdot \chi(\Delta_{ER}(\mathbf{x})|p, C) \cdot P(\Delta(\mathbf{x})|a_x) d\mathbf{x}$ corresponds to the radical scenario of infiltration processes development. Within this scenario, due to latent defects of the hydraulic structure body material in the point $\mathbf{x}$, infiltration processes begin to develop sharply intensively

and with high probability deviate from their calculated values. As latent defects in a bulk tailings dam, for example, large ice aggregates can be considered which are often placed in the dam body during the construction phase under cryolithozone conditions. In the process of climate change, gradually, these inclusions begin to melt leading to the formation of voids and loosening of the dam body. Thus, conditions are created for sharp intensification of infiltration processes which can lead to the destruction of the dam. Since the number of DAS system channels is finite, expression (4) should be modified as follows:

$$R_K(\mathbf{\Delta}_{ER}^X) = \sum_{k\in K} P_c(\Delta_k)\cdot L(\Delta_k)\cdot \rho_G^*(\Delta_k) + \\ + \sum_{k\in K} P_c(\Delta_k)\chi(\Delta_k|p, C)\cdot P(\Delta_k|a_k).$$

Here $k$ is the channel index of the DAS system; $K$ is the set of indexes of the channels of this system; and $\Delta_k$ is the value of the parameter $\Delta_{ER}(\mathbf{x}_k)$ from (3) at the point $\mathbf{x}_k$ of the location of the $k$-th channel of the system.

Since the risk function is designed to estimate the deviation degree of the current state of a hydraulic structure from the normal one, which corresponds to the value $R_K(0)$, the decision about exceeding the current risk of the permissible value is made in the following case:

$$\ln\left(\frac{R_K(\mathbf{\Delta}_{ER}^X)}{R_K(0)}\right) \geq \lambda.$$

Here λ is the scalar threshold selected according to the results of numerical simulation within DTIP, individually for each hydraulic structure.

**Infiltration signal classification and $P_c(\mathbf{x})$ estimation**

The most important part of the hydraulic structure monitoring data processing system is a subsystem for automatic classification of the SES type whose signal was received by DAS system. This is important because when forming the estimate $v^{(R)}(\mathbf{x})$ in (3), the monitoring system must take into account signals from infiltration-type SES only that are always received by DAS system in superposition with signals of noise signals (signals from non-target SES's). In the case of using a DAS system, each of its channels receives data about the state of the seismoacoustic field of the hydrostructure body at the location of this channel. Let's consider the case when the task of detecting target SES sources is solved in each channel independently, and cross-channel, integral data processing is performed already at the following stages of processing. In this case, a stream of raw data coming from the $k$-th channel of the system is processed on the basis of a sequence of time intervals $T_i(\delta) = (t_i^S, t_i^E)$, $t_i^E = t_i^S + \delta$, $i \geq 0$ of equal length δ, sometimes called "windows". A time window $T_i(\delta)$ is characterized by a pair $(t_i^S, t_i^E)$, where $t_i^S$ is the moment of the beginning of the time interval, and $t_i^E$ is the moment of its termination.

To reduce the unwieldiness of the record, let us assume that $T_i(\delta)$ consists of δ samples. Each time interval $T_i(\delta)$ in the $k$-th channel corresponds to a set of channel measurements $\lambda(T_i(\delta))$ (raw data), $\lambda(T_i(\delta)) \in \Lambda$ which were obtained during this interval in this channel and which characterize the dynamics of the seismoacoustic field at point $\mathbf{x}_k$. Here Λ is the set of all possible realizations of $\lambda(T_i(\delta))$. Let the set $\Pi = \{\pi_i | i = 1, \ldots, N\}$ contain all target SES types, including the background class. The task is to construct a classifier D such that

$$\Lambda \xrightarrow{D} \Pi, \forall i \geq 0: \pi = D(\lambda(T_i(\delta))) \in \Pi. \quad (5)$$

As indicated earlier, the background class (class of generalized noises and non-target SES belongs to the set Π. Therefore, the classification problem (5) implicitly includes the problem of detecting the target SES. When building a classifier D using machine learning methods, the choice of feature space **F** plays a special role. When forming **F**, initially, we considered a set consisting of more than 40 features. At subsequent stages, this set was reasonably narrowed down by selecting the most informative features. Several methods were used including three so-called "filtering" methods: chi-square, Pearson correlation and analysis of variance (ANOVA), as well as adaptive method of backward elimination. As a result, the following set $f_\lambda$ of features was obtained:

$$f_\lambda = (\mathbf{E}[\lambda], |\lambda|, ST(\lambda), H_m(\lambda), r_\lambda, E^*(A_\lambda(l)), |A_\lambda(l)|, st^*(A_\lambda(l))).$$

Here

— $\lambda \in \Lambda \subseteq R^\delta$; $<\lambda>_p$ is $p$-th component of λ;

— $E[\lambda] = \sum_p <\lambda>_p \delta^{-1}$;

— $|\lambda| = \max_p(<\lambda>_p) - \min_p(<\lambda>_p)$:

— $ST(\lambda) = (\sum_p (\mathbf{E}[\lambda] - <\lambda>_p)^2 \cdot \delta^{-1})^{0.5}$;

— $H_m(\lambda)$ is histogram of λ with $m$ bins;

— $A_\lambda(l)$ is autocorrelation function of the λ, $l \in (0, \delta)$ is shift;

— $r_\lambda$ is radius correlation of λ;

— $E^*(A_\lambda(l)) = \sum_{l \geq r_\lambda} A_\lambda(l)(\delta - r_\lambda)^{-1}$;

— $|A_\lambda(l)| = \max_{l \geq r_\lambda}(A_\lambda(l)) - \min_{l \geq r_\lambda}(A_\lambda(l))$;

— $st^*(A_\lambda(l)) = (\sum_{l \geq r_\lambda} (E^*(A_\lambda(l)) - A_\lambda(l))^2 (\delta - r_\lambda - 1)^{-1})^{0.5}$.

In numerical studies it was assumed that $m = 20$. The features $f_\lambda$ are defined in the corresponding feature space **F**, consisting of real vectors of length 27.

To train and test the classification algorithm, we used a Data Set collected at several different test sites, at different times of the year. This Data Set included three-second samples of fluid dynamics signals of the following types:

— Class 0: small underground river, name: "River Flow Sound", 509 samples, Fig. 5;

— Class 1: noise of melting snow infiltration, name: "Melting Snow Flow Sound", 1059 samples, Fig. 6;

— Class 2: noise from an underground drainage pipeline, name: "Pipe Flow Sound", 339 samples, Fig. 7;

— Class 3: background seismoacoustic noise, name: "Background sound", 1168 samples, Fig. 8.

Fig. 6–9 show a typical histogram, autocorrelation function, and waterfall diagram for classes 0–3.

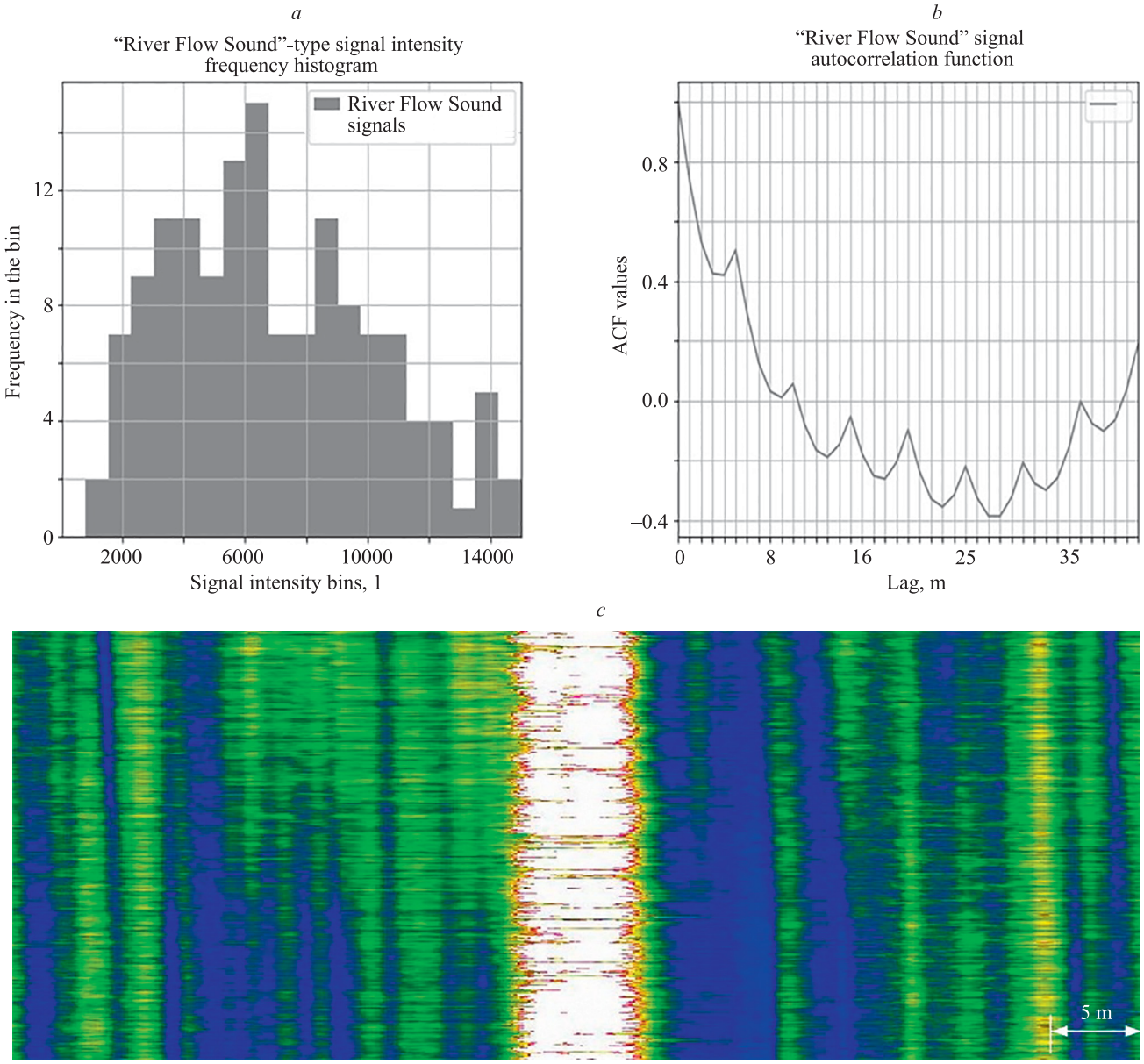



*Fig. 5*. Typical histogram (*a*), autocorrelation function (*b*), and waterfall diagram (*c*) for class 0, "River Flow Sound"

As can be seen from the behavior of the autocorrelation functions of signals of different classes, they all have an oscillatory nature. Moreover, the period of the dominant harmonic of these oscillations does not exceed the value of 3–5 s.

Since the dimensionality of feature space **F** is relatively small, and the signals in Data Set have a relatively large $r_\lambda$ value, the samples of the same class will relatively "smoothly" differ from each other by the metric of feature space. Under these conditions, it is logical to use as a D-classifier a conventional and very computationally economical multi-class SVM (MC-SVM) [15]. During training, in order to ensure control of the generalization ability of the classifiers, the standard Cross Validation scheme was used, in the LOO (leave-one-out) variant. For the MC SVM classifier, given the multiclass formulation of the problem, a one-vs-rest strategy was used.

The results of the numerical studies are summarized in Tables 1 and 2. The main information is contained in Table 1. Here we accumulate the results which were shown on the test Data Set by classifiers based on MC SVM. A standard set of metrics was used to evaluate the classification results: precision, recall, and f1-score. The "support" column contains the number of samples of each class that were used in the test. Table 2 shows the so-called confusion matrix obtained as a result of the numerical experiment. The quality metrics of Table 1 indicates a very high quality of infiltration event classification. On the other hand, the confusion matrix (Table 2) shows that only the River Flow class causes small problems in classification: several samples from other classes were mistakenly assigned to this class. This is due to the fact that this infiltration class is quite close in its physical nature to other infiltration classes. Importantly, the vast majority of classification errors were due to confusion within the infiltration classes. All these classes are target classes for the monitoring system; the main thing is that the system classifier should be able to qualitatively distinguish

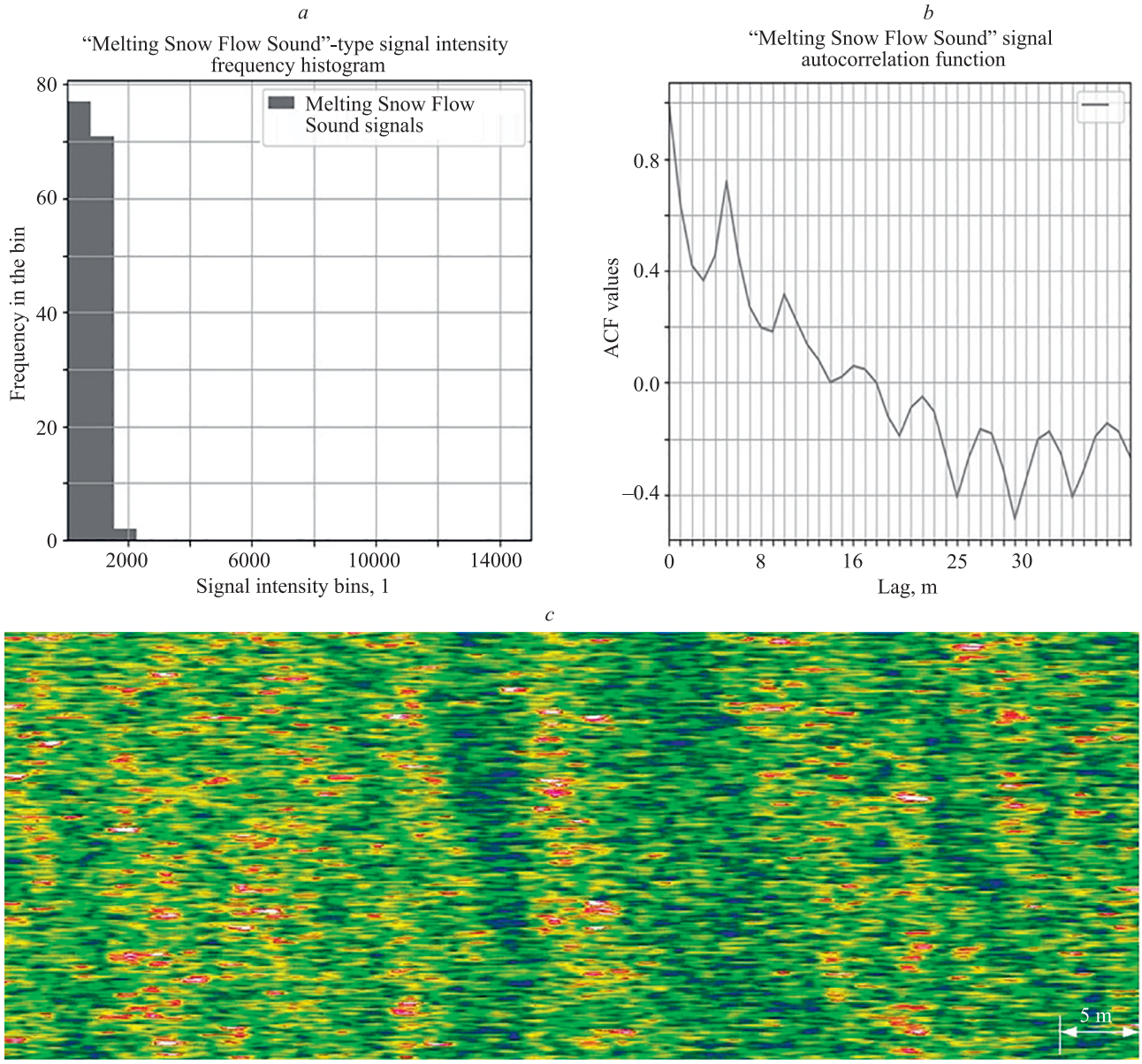



*Fig. 6.* Typical histogram (*a*), autocorrelation function (*b*), and waterfall diagram (*c*) for class 1, "Melting Snow Flow Sound"

*Table 1.* The basic metrics values on the test Data Set

| SES class name | Precision | Recall | f1-score | Support |
|---|---|---|---|---|
| River Flow | 0.96 | 1.00 | 0.98 | 128 |
| Melting Snow Flow | 1.00 | 0.99 | 0.99 | 276 |
| Pipe Flow | 1.00 | 0.99 | 0.99 | 75 |
| Background | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 290 |

*Table 2.* Confusion matrix

| SES class | River Flow | Melting Snow Flow | Pipe Flow | Background |
|---|---|---|---|---|
| River Flow | 128 | 0 | 0 | 0 |
| Melting Snow Flow | 4 | 272 | 0 | 0 |
| Pipe Flow | 1 | 0 | 74 | 0 |
| Background | 1 | 0 | 0 | 289 |

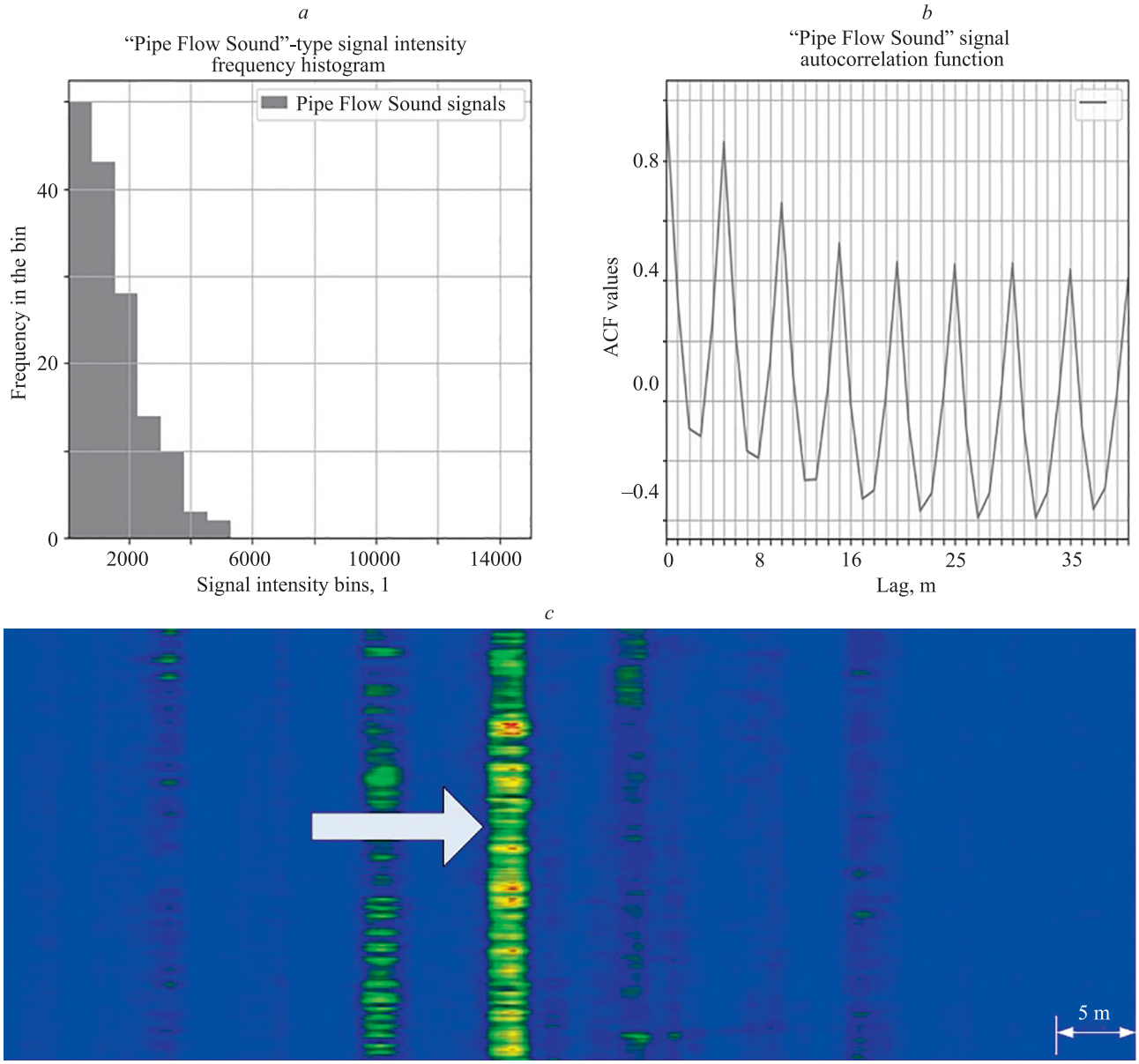



*Fig. 7*. Typical histogram (*a*), autocorrelation function (*b*), and waterfall diagram (*c*) for class 2, "Pipe Flow Sound"

the signals of this type, distinguishing them from the background or noise signals. Only one error represents confusion with a non-target (non-infiltration) class (background). This is a very qualitative result. In general, the classification results are close to perfect. Thus, it is shown: the DAS system detects and classifies infiltration SES very well. It is logical to use the class-averaged f1-score as an estimate of the $P_c(\mathbf{x})$ value from (4).

## Engineering aspects of DAS system installation on a hydraulic facility

The main problem that arises when installing a fiber-optic monitoring system for a hydraulic structure is the installation of the fiber-optic sensor in the body of the hydraulic structure. The principle of installation is simple: as much coverage as possible of the structure's body volume in critical areas. Critical areas are determined at the stage of design of a structure and, as a rule, are located in the areas below the calculated plane of depression (which in the 2D case is called the depression curve). The depression plane is the geometric location of the points of the upper boundary line of the infiltration processes flow in the case of conservative (normal) scenario. Fig. 9 shows a possible way of installing a fiber-optic sensor in the body of the tailings dam. The sensor stacking step depends on the sensitivity of the DAS system and for target SES's is approximately 5 m. In order to maximize the seismoacoustic field control of the hydraulic structure dam, the sensor is placed inside the dam body volume according to the principle of maximum coverage.

## Discussion

The monitoring method considered in this article, on the one hand, allows with high reliability and continuity

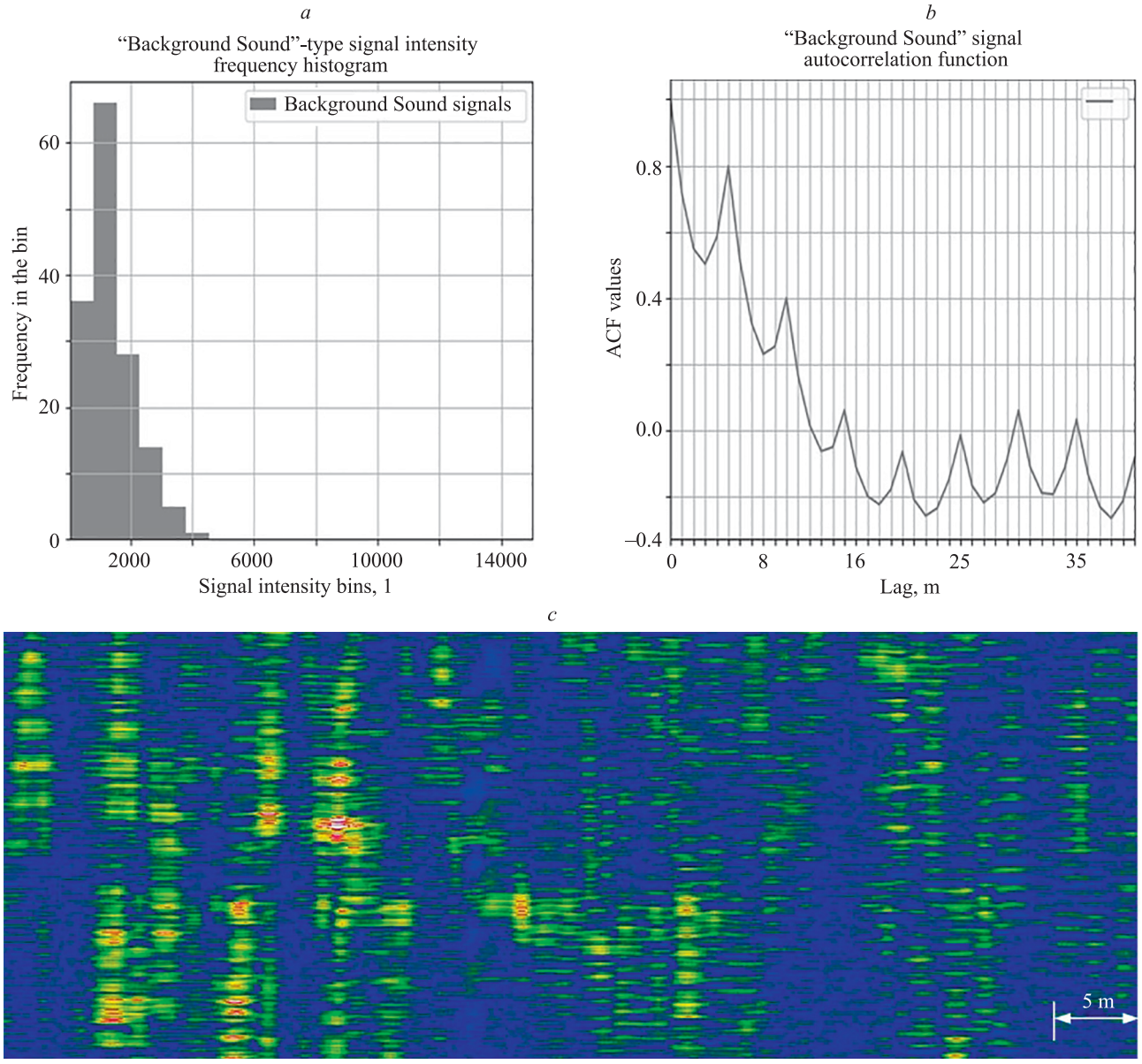



*Fig. 8*. Typical histogram (*a*), autocorrelation function (*b*), and waterfall diagram (*c*) for class 3, "Background sound"

to control sufficiently long (perimeter 5–20 km and more) facilities, and on the other hand — indicates the way to monitor effective use of data for formal risk analysis of the operation of a particular object. The use of a digital twin of the infiltration activity inside the object body allows us to determine threshold values in risk management procedures, and the application of AI/ML methods for signal source type classification, with high reliability (this property is proved by materials of this work) to distinguish only target signals, caused by infiltration activities. Of course, the ideal solution to the monitoring task would be the use of a highly sensitive high-density piezometric network which would evenly (solidly) cover the entire body of the object. But such a solution is practically unavailable, due to the enormous cost of both the piezometer-type sensor network installation in the body of the structure and the high cost of owning this network. The fact is that point sensors will require constant service, including repairs, replacement of batteries, monitoring of communication channels, and periodic status checks of hundreds of point sensors to ensure

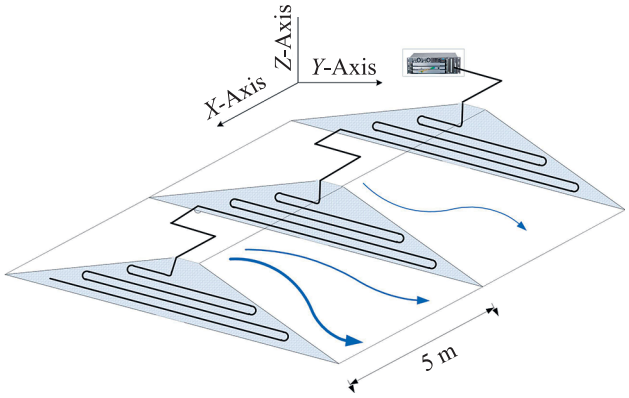



*Fig. 9*. Installation of a fiber-optic sensor in a tailings dam body

that literally every sensor is compliant with the instrument certificate. In these conditions, DAS monitoring system, slightly inferior in sensitivity and accuracy piezometric network, looks extremely promising and a compromise solution if we compare alternative systems in the criteria space of "price-quality-functionality". The sensor of a DAS system does not require maintenance and remains operational for decades, only the system interrogator needs service. But this device is manufactured in accordance with the highest standards of communication equipment and it is able to function for 5–6 years or more in harsh climatic conditions, almost without maintenance. An additional bonus of using the DAS monitoring system is its extreme unpretentiousness: authors of the article have experience of non-stop, trouble-free operation of the interrogator for 6 years, and the temperature in the room where the interrogator was located reached +40 °C in summer and dropped to –25 °C in winter. These qualities are especially valuable when monitoring objects located in the cryolithozone, for example, for tailings dams with bulk dams.

## Conclusion

Having achieved all the goals that have been set in this paper, the authors plan to focus in the future on solving the following tasks aimed at the practical strengthening of the proposed solution:

— DTIP model refinement;
— Refining the methodology designed to estimate the risk of damage to a hydraulic facility due to uncontrolled development of infiltration processes;
— Development of DTIP-based methods of forecasting the development of the infiltration processes dynamics inside specific hydraulic structure body;
— Development of technology for optimal installation of a fiber-optic sensor in the specific hydraulic structure body.

## References


1. Sukhno A.M., Khlapov N.N. Automatic system for monitoring at the tailing storage of Aikhal'sky mining and concentrating works. *Gornyi Zhurnal*, 2008, no. 5, pp. 65–68. (in Russian).
2. Besimbaeva O.G., Khmyrova E.N., Loginov A.V., Oleinikova E.A. Research of the opportunities of 3D modeling for mine surveying support of mining works. *Interexpo GEO-Siberia*, 2017, vol. 1, no. 1, pp. 125–129. (in Russian).
3. Aravin V., Numerov S. *The Theory of Motion of Liquids and Gases in Non-Deformable Porous Medium*. Moscow: Gosudarstvennoe izdatel'stvo tehniko-teoreticheskoj literatury, 1953, 616 c. (in Russian).
4. Timofeev A.V., Groznov D.I. Classification of seismoacoustic emission sources in fiber optic systems for monitoring extended objects. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2020, vol. 56, no. 1, pp. 50–60. https://doi.org/10.3103/S8756699020010070
5. Timofeev A.V., Denisov V.M. Multimodal heterogeneous monitoring of super-extended objects: Modern view. *Studies in Systems, Decision and Control*, 2016, vol. 62, pp. 97–116. https://doi.org/10.1007/978-3-319-32525-5_6
6. Becker M., Coleman T., Ciervo C., Cole M., Mondanos M. Fluid pressure sensing with fiber-optic distributed acoustic sensing. *Leading Edge*, 2017, vol. 36, no. 12, pp. 1018–1023. https://doi.org/10.1190/tle36121018.1
7. Liu X., Jin B., Bai Q., Wang Y., Wang D., Wang Y. Distributed fiber-optic sensors for vibration detection. *Sensors*, 2016, vol. 16, no. 8, pp. 1164. https://doi.org/10.3390/s16081164
8. Wang Y., Jin B., Wang Y., Wang D., Liu X., Bai Q. Real-time distributed vibration monitoring system using Φ –OTDR. *IEEE Sensors Journal*, 2017, vol. 17, no. 5, pp. 1333–1341. https://doi.org/10.1109/jsen.2016.2642221
9. Inaudi D., Cottone I., Figini A. Monitoring dams and levees with distributed fiber optic sensing. *Proc. of the 6th International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure*, 2013.
10. Johansson S., Beaupretre S., Boue A., Stork A. *Distributed Acoustic Sensing for Detection of Defects in the Test Dam at Älvkarleby*. Technical Report. 2021. Available at: https://energiforsk.se/en/programmes/dam-safety/reports/distributed-acoustic-sensing-for-detection-of-defects-2021-732/ (accessed: 15.12.2021).
11. Ouellet S., Suszek N., Lato M., Russell B., Froese C., Carey E. Static liquefaction-type tailings dam failures: understanding options for detecting failures. *Proc. of Tailings and Mine Waste, November 17–20 2019. Vancouver, Canada*. University of British Columbia, 2019, pp. 415–420.
12. Forbes B., Ouellet S., Suszek N., Lato M., Russell B. Application of distributed acoustic sensing within a tailings dam warning system. *Proc. of Tailings and Mine Waste Conference*, 2021.


## Литература


1. Сухно А.М., Хлапов Н.Н. Автоматизированная система мониторинга на хвостохранилище Айхальского ГОКЕ // Горный журнал. 2008. № 5. С. 65–68.
2. Бесимбаева О.Г., Хмырова Е.Н., Логинов А.В., Олейникова Е.А. Мониторинг состояния дамбы хвостохранилища намывного типа // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. 2017. Т. 1. № 1. С. 125–129.
3. Аравин В.И., Нумеров С.Н. Теория движения жидкостей и газов в недеформируемой пористой среде. М.: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1953. 616 с.
4. Timofeev A.V., Groznov D.I. Classification of seismoacoustic emission sources in fiber optic systems for monitoring extended objects // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. 2020. V. 56. N 1. P. 50–60. https://doi.org/10.3103/S8756699020010070
5. Timofeev A.V., Denisov V.M. Multimodal heterogeneous monitoring of super-extended objects: Modern view // Studies in Systems, Decision and Control. 2016. V. 62. P. 97–116. https://doi.org/10.1007/978-3-319-32525-5_6
6. Becker M., Coleman T., Ciervo C., Cole M., Mondanos M. Fluid pressure sensing with fiber-optic distributed acoustic sensing // Leading Edge. 2017. V. 36. N 12. P. 1018–1023. https://doi.org/10.1190/tle36121018.1
7. Liu X., Jin B., Bai Q., Wang Y., Wang D., Wang Y. Distributed fiber-optic sensors for vibration detection // Sensors. 2016. V. 16. N 8. P. 1164. https://doi.org/10.3390/s16081164
8. Wang Y., Jin B., Wang Y., Wang D., Liu X., Bai Q. Real-time distributed vibration monitoring system using Φ -OTDR // IEEE Sensors Journal. 2017. V. 17. N 5. P. 1333–1341. https://doi.org/10.1109/jsen.2016.2642221
9. Inaudi D., Cottone I., Figini A. Monitoring dams and levees with distributed fiber optic sensing // Proc. of the 6th International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure. 2013.
10. Johansson S., Beaupretre S., Boue A., Stork A. Distributed Acoustic Sensing for Detection of Defects in the Test Dam at Älvkarleby: Technical Report. 2021 [Электронный ресурс]. URL: https://energiforsk.se/en/programmes/dam-safety/reports/distributed-acoustic-sensing-for-detection-of-defects-2021-732/ (дата обращения: 15.12.2021).
11. Ouellet S., Suszek N., Lato M., Russell B., Froese C., Carey E. Static liquefaction-type tailings dam failures: understanding options for detecting failures // Proc. of Tailings and Mine Waste, November 17–20 2019. Vancouver, Canada. University of British Columbia, 2019. P. 415–420.
12. Forbes B., Ouellet S., Suszek N., Lato M., Russell B. Application of distributed acoustic sensing within a tailings dam warning system // Proc. of Tailings and Mine Waste Conference, 2021.

13. Rasskazov L.N., Orekhov V.G., Aniskin N.A. *Hydrotechnical Constructions. Part 1*. Textbook. Moscow: Association of Civil Engineering Universities Publ., 2008. 575 p. (in Russian).
14. Shapiro N., Campillo M., Stehly L., Ritzwoller M. High-resolution surface-wave tomography from ambient seismic noise. *Science*, 2005, vol. 307, no. 5715, pp. 1615–1618. https://doi.org/10.1126/science.110833
15. Cristianini N., Shawe-Taylor J. *An Introduction to Support Vector Machines and Other Kernel-based Learning Methods*. Cambridge University Press, 2000, 189 p.

13. Рассказов Л.Н., Орехов В.Г., Анискин Н.А. Гидротехнические сооружения. Ч. 1: учебник. М.: Ассоциация строительных вузов, 2008. 575 с.
14. Shapiro N., Campillo M., Stehly L., Ritzwoller M. High-resolution surface-wave tomography from ambient seismic noise // Science. 2005. V. 307. N 5715. P. 1615–1618. https://doi.org/10.1126/science.110833
15. Cristianini N., Shawe-Taylor J. An Introduction to Support Vector Machines and Other Kernel-based Learning Methods. Cambridge University Press, 2000. 189 p.

## Authors

**Andrey V. Timofeev** — D. Sc. (Eng.), CSO, LLP "EqualiZoom", Astana, 010000, Kazakhstan, Sc 56689367600, https://orcid.org/0000-0001-7212-5230, timofeev.andrey@gmail.com

**Denis I. Groznov** — Software Developer, LLP "EqualiZoom", Astana, 010000, Kazakhstan, Sc 56689367600, https://orcid.org/0000-0002-7874-7118, d.i.groznov@yandex.ru

## Авторы

**Тимофеев Андрей Владимирович** — доктор технических наук, научный директор, ТОО «Эквалайзум», Астана, 010000, Казахстан, Sc 56689367600, https://orcid.org/0000-0001-7212-5230, timofeev.andrey@gmail.com

**Грознов Денис Игоревич** — разработчик, ТОО «Эквалайзум», Астана, 010000, Казахстан, Sc 56689367600, https://orcid.org/0000-0002-7874-7118, d.i.groznov@yandex.ru

*Received 19.01.2022*
*Approved after reviewing 01.05.2022*
*Accepted 25.05.2022*

*Статья поступила в редакцию 19.01.2022*
*Одобрена после рецензирования 01.05.2022*
*Принята к печати 25.05.2022*

Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ
май–июнь 2022 Том 22 № 3 http://ntv.ifmo.ru/
SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL OF INFORMATION TECHNOLOGIES, MECHANICS AND OPTICS
May–June 2022 Vol. 22 No 3 http://ntv.ifmo.ru/en/
ISSN 2226-1494 (print) ISSN 2500-0373 (online)
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ

doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-3-623-633

# Slotted waveguide antenna design for maritime radar system

**Riyaz Pathan[1]✉, Ashutosh Tripathi[2]**

[1] Amity University, Jaipur, 303002, India
[1] Anjuman-I-Islam's Kalsekar Technical Campus (AIKTC), Navi Mumbai, 410206, India
[2] Chandigarh University, Chandigarh, 140413, India

[1] Riyazp4@gmail.com✉, https://orcid.org/0000-0002-7012-7731
[2] Ashu20034@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-3709-9182

**Abstract**
Waveguide structures have got popularity because of its extensive application in radar system of naval ships and aircrafts. Waveguide models provide high probability of small target detection and reduce rate of false target detection. There are a large number of studies on the waveguide slotted in the wide wall. Researches concerning the narrow wall of the waveguide are much less known. An edge slotted waveguide antenna array based on semicircular end of inclined slots radiating waveguide is proposed. Length of the inclined slot is extended to the adjacent broad wall with semicircular cutting. This extended length increases the resonant length and hence higher gain is obtained. Semicircular cutting at the end of the slot reduces cross-polarization component hence side lobe level obtained are low. Narrow wall inclined slotted waveguide is analyzed and designed to operate in X-band. The radiating slots are etched and rotated alternatively on the broadened top plate with semicircular cutting into the adjacent walls. This technique deletes the radial component of the propagating wave and adds the axial component of the propagating wave. Semicircular cutting increases the resonant length and enhances the gain of the antenna. Designed waveguide structure provides high gain, and cross-polarization component is minimized. Gain of 26 dB is obtained from the simulation results obtained in HFSS (High frequency Software Simulation) and side lobe level obtained is around 20 dB while hardware design provides the gain of 24.5 dB measured on VNA (Vector Network Analyzer) keeping the side lobe level minimum.

**Keywords**
slotted waveguide, gain, radiation pattern, return loss, inclined slots, X-band frequency, narrow wall

**Acknowledgement**
We would like to acknowledge Kalsekar technical campus of Mumbai University and Chandigarh University for providing us the infrastructure support, and lab set up to carry out the experiments. We would also like to thank Professor Rahul Khadase for helping us out in hardware manufacturing.

**For citation:** Riyaz P., Ashutosh T. Slotted waveguide antenna design for maritime radar system. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2022, vol. 22, no. 3, pp. 623–633. doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-3-623-633

УДК 621.396.676

# Конструкция волноводной антенны с прорезями для морской радиолокационной системы

**Патхан Рияз[1]✉, Трипати Ашутош[2]**

[1] Университет Амити, Джапур, 303002, Индия
[1] Технический кампус Калсекар Мумбайского университета (AIKTC), Нави-Мумба́и, 410206, Индия
[2] Университет Чандигар, Чандигар, 140413, Индия

[1] Riyazp4@gmail.com✉, https://orcid.org/0000-0002-7012-7731
[2] Ashu20034@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-3709-9182

**Аннотация**
Волноводные конструкции приобрели популярность благодаря широкому применению в радиолокационных системах кораблей и самолетов Военно-морского флота. Волноводные модели обеспечивают высокую

© Riyaz P., Ashutosh T., 2022

вероятность обнаружения мелких целей и снижают вероятность обнаружения ложных целей. Существует большое число исследований по широкой стенке щелевого волновода. Исследования, касающиеся узкой стенки волновода, известны много меньше. В работе предложена краевая волноводная щелевая антенная решетка на основе полукруглого конца наклонных щелевых излучающих волноводов. Длина наклонной прорези расширена до прилегающей широкой стенки полукруглой вырезки. Увеличенная длина повышает резонансную длину. Таким образом достигается более высокое усиление. Полукруглая вырезка в конце щели уменьшает составляющую кросс-поляризации, поэтому получаемый уровень боковых лепестков низкий. Проанализирован и спроектирован узкостенный наклонный щелевой волновод для работы в X-диапазоне. Излучающие щели выполнены и поочередно повернуты на уширенной верхней пластине с полукруглой врезкой в соседние стенки. Этот метод позволяет удалять радиальную составляющую распространяющейся волны и добавляет осевую составляющую распространяющейся волны. Полукруглая нарезка увеличивает резонансную длину и увеличивает коэффициент усиления антенны. Разработанная волноводная структура обеспечивает высокий коэффициент усиления, а кроссполяризационная составляющая сведена к минимуму. В результате высокочастотного программного моделирования (High frequency Software Simulation, HFSS) получено усиление 26 дБ, уровень боковых лепестков составил около 20 дБ. Исследование реальной конструкция модели обеспечило усиление 24,5 дБ, измеренное на векторном анализаторе цепей (Vector Network Analyzer, VNA) при сохранении минимального уровня боковых лепестков.

**Ключевые слова**
щелевой волновод, коэффициент усиления, диаграмма направленности, обратные потери, наклонные щели, частота X-диапазона, узкая стенка

**Благодарности**
Авторы благодарят технический кампус Калсекар Мумбайского университета и Чандигархский университет за предоставление поддержки инфраструктуры и создание лаборатории для проведения экспериментов. Мы также хотели бы поблагодарить профессора Рахула Хадасе за помощь в предоставлении оборудования.

**Ссылка для цитирования:** Рияз П., Ашутош Т. Конструкция волноводной антенны с прорезями для морской радиолокационной системы // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2022. Т. 22, № 3. С. 623–633 (на англ. яз.). doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-3-623-633

## Introduction

Waveguides are being utilized to transmit the electromagnetic energy via waveguides to detect the target and the target location. Waveguides are considered to be compact and robust to tolerate the roll of aircrafts and ships [1]. Waveguides are made in workshop from copper metal 1.25 mm thick. Waveguide slots can be made in both broad and narrow wall of the waveguide. Different shapes and position of slots produce varying effects in the output radiation pattern and their characteristics in terms of gain and side lobe levels [2]. WR90 waveguide is chosen for use in X-band applications like submarines and aircrafts. Waveguide antennas generally employ array of slots to produce high gain and to get high probability of correct target detection. Choice of etching the slot in either broad wall or narrow wall depends on the researcher and manufacturer as on the requirement of the application [3]. A good waveguide array should have very low cross-polarization component and low side lobe levels so that the false target detection rate decreases. High frequency software simulation (HFSS) is used as a tool to detect the effectiveness of the designed waveguide and the various radiation parameters. Radiation parameters like lobe gain, far field, near field, return loss 3D radiation pattern are analyzed in the HFSS version 15.0 [4]. To give an effective output, the design should be employed with the aim of increasing the radiation in the direction of the target and reducing the radiation in the direction other than target as shown in Fig. 1. It helps increasing the main lobe and reducting side lobe of waveguide.

Two components which are responsible for the high side lobe levels are effective aperture offset of the waveguide and the component of the cross-polarization of the antenna. To work efficiently as a radar antenna, waveguide must have some characteristics; for example, the radiated energy must be focused on the target, or radiated return energy from the target only must be taken into account [5]. It should have high gain and low side lobes because the energy radiated from the side lobes increases the loss and reduces the gain. The causes of side lobes are the offset of the waveguide structure aperture and cross-polarization component. HFSS is used to simulate the designed structure, and results are obtained for the return loss gain, far field and near field radiation pattern [6].

## Related work

Slotted waveguide narrow wall antenna was simulated [7] and, after analyzing the radiation pattern in CST simulation software, they found that when two waveguides with 32 slots in narrow wall were combined, the combined structure would have 64 slots. The authors designed three such narrow wall waveguides and combined the waveguide with and without flange connectors. The simulation of

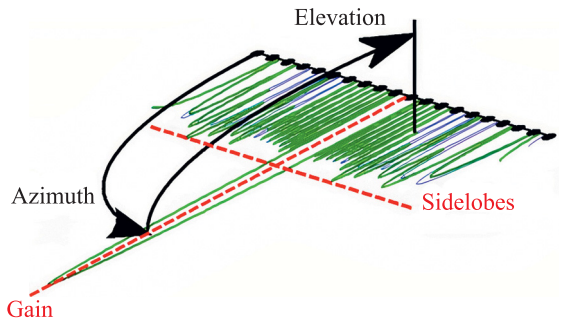



*Fig. 1*. Radiation pattern suitable for waveguide

these three structures was performed in CST simulation software and their radiation characteristics were analyzed. The maximum they could achieve by combining two waveguides with total 64 slots was 23 dB. They analyzed the effect of flange connector on the radiation pattern and found that the gain increases by combining two waveguides but the impact of flange connector causes side lobe level of the waveguide to increase. This is not suitable for the waveguide since it increases the false detection rate of the target primary antenna in which etching of 64 slots was developed and its radiation pattern and slot parameters are analyzed [8]. Secondary, waveguide is structured with 32 slots and two such structures are attached together to get the complete structure. Third one was formulated using trimmed flange connector and the design was simulated which shows that the maximum gain with low side lobe is achieved in case of the first designed structure. Second structure shows the good increment in gain but side lobe levels are also raised due to flange connector. Trimmed flange connector provides low gain and high side lobes [9]. The maximum gain achieved using flange connector was 23 dB.

Researchers [10] formulated a waveguide with slots etched in the broad wall and attached a reflector to get the higher gain. They etched 16 slots in the broad wall of the waveguide and a reflector was used along with the waveguide structure. This arrangement was simulated in HFSS with transmitted TE10 electromagnetic wave through broad wall slotted WR90 waveguide structure. They analyzed radiation pattern in simulation software and achieved the gain of 22.5 dB. The structure is simulated for the frequency of 9.4 GHz and the adding horizontal polarization increased the reflector gain to 22.5 dB [11]. The structure was simulated with and without reflector and found that the use of reflector increases the gain of the waveguide but the gain side lobe level also increases. The gain of the waveguide without reflector was calculated as 16 dB [12], by incorporating reflector gain increases to 22.5 dB.

Researcher [13] worked on the Planar Structure of the waveguide and formulated several branch feed waveguide structures and calculated weight of the element by incorporating Taylor aperture. They compared the calculated and simulated results. They calculated the gain in the Taylor's aperture in E plane by transmitting electromagnetic wave at 9.37 GHz [14]. The designed waveguide along with the branch feed waveguide was simulated in the Microwave CST Software and its return loss, radiation pattern, far field and near field patterns are analyzed; the gain of 25 dB was achieved [15]. They represented the feed current of the designed structure in simulation and showed that as the feed point is moved away from the center of the structure, surface current starts decreasing [16].

## Contributions

A thorough examination of the manuscripts discussed in the preceding section shows that the vast majority of authors have primarily concentrated on the broad wall of the antenna and neglected the advantage of narrow walls of the waveguide. In this research, narrow wall side of the antenna is analyzed for array of slots. The contribution to the research article is as follows.

We present a new design model for the waveguide having slots in the narrow wall of the waveguide. Waveguide is analyzed for various array and slot inclinations. The simulation was performed in HFSS.

Hardware model of the waveguide was manufactured and tested in the laboratory on VNA (Vector Network Analyzer) to verify and compare the simulation results.

Gain and side lobe level of the designed waveguide was estimated for both simulation model and hardware model.

The performance of the designed model was compared with the latest findings by the researchers and their proposed models.

Finally, advantages and disadvantages of the designed model are compared with the previously proposed models.

No extra component is incorporated in the waveguide structure to achieve higher gain to keep the structure less complex, durable and robust to cope with the roll of the ship and aircraft.

## Mathematical Model

In the designed structure, WR90 waveguide is used with slots etched in the narrow wall side of the waveguide. Three structures are designed with two groups of four and ten slots with the help of HFSS. The slots initially remain vertical and are simulated in the software, but these vertical slots run parallel to the current flow because these vertical slots do not interrupt the current flow, the structure does not radiate and practically very low gain is obtained. Then slots are etched in the horizontal direction and structure is analyzed by transmitting electromagnetic wave at 9 GHz. Horizontal slots alter the current flow but it increases the side lobe level which leads to the detection of false target hence inclination of 45 degree is used for the slots [17].

These inclinations are kept opposite to each other for the nearby slots in order to cancel the one component as shown in Fig. 2 and to get the maximum gain for the other component. Slot parameters are calculated using the structure shown in Fig. 3 and equations shown are employed to get the slot parameters resonant length which is calculated as 14.35 mm.

These slots are extended from the top broad wall to the bottom broad wall. Slots are further extended by 2 mm in the broad walls by etching slots in semicircular shape.

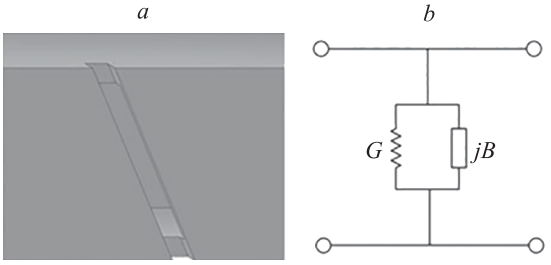



*Fig. 2*. Inclined slots in narrow wall with semicircular cutting: inclined slot (*a*); admittance of the slot where *G* is the conductance and *jB* is the susceptance (*b*)

*Table.* Parameters for simulation

| Parameters | Specification |
|---|---|
| X-band Frequency, GHz | 9 |
| Slot size, mm | 16.67 |
| Slot width, mm | 2.4 |
| Gap between the slots, mm | 24.35 |
| Distance of last slot from, mm | 12.18 |
| Inclination of the slot, deg | 45 |

These semicircular shaped slots increase radiation by altering the current flow, thereby increasing the gain of the antenna in desired direction while reducing the gain in the side lobes of the antenna. Width of the slot is calculated as 2.4 mm and spacing between the nearby slots is calculated as 24.35 mm. Waveguide is short circuited at one end and the gain is calculated at the 90°. The distance of the first slot from the short-circuited end is calculated as 12.18 mm. The structure is designed using copper metal plate with the thickness of 1.25 mm. In the first designed structure slots are etched in the one of the narrow wall sides of the antenna.

The structure is simulated in the Ansys HFSS, the electric field component is assumed to be vertical, and the perfect E is assumed for the entire structure. Frequency range is selected for X-band ranging from 8 to 12 GHz as specified in Table. The model is simulated in HFSS and the gain of the antenna, far field and near field radiation pattern and return loss are analyzed. Return loss is found to be greater than 10 dB and gain of 16 dB is achieved for the frequency of around 90°. The side lobe levels are at 10 dB level. Frequency is increased with the step of 0.2. In Fig. 3 *Yin* is the input admittance, *L* is the inductance, *Y* is the admittance, *d* is the slot distance.

$$Hx = -\frac{Eo}{4\pi f\mu} B\sin\frac{\pi x}{a} e^{-j\beta z} \qquad Hz = \mathbf{j}\frac{Eo}{2\pi f\mu}\cos\frac{\pi x}{a} e^{-j\beta z}$$

$$Jx = -\mathbf{j}\frac{Eo}{2\pi f\mu} B\cos\frac{\pi x}{a} e^{-j\beta z} \qquad Jz = -\frac{Eo}{2\pi f\mu} B\sin\frac{\pi x}{a} e^{-j\beta z}$$

$$L = \lambda g/4$$

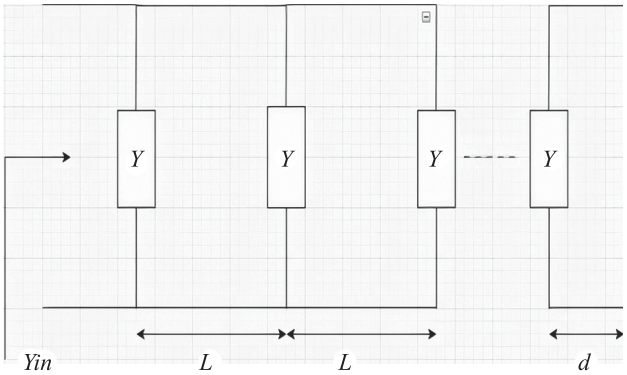



*Fig. 3*. Calculation of parameters for waveguide

Where *Hx* is magnetic field intensity in *x* direction; *Hz* is magnetic field intensity in *z* direction; *L* is resonant length = 0.465λ; β is propogation constant; *Eo* is maximum amplitude of electromagnetic wave; *B* is magnetic flux density; *f* is frequency of electromagnetic wave; *a* is width of the waveguide; λ*g* is guided wavelength in waveguide; μ is permiability of the medium; *J* is current density; **j** is unit vector in the direction of propogation; *z* is *z* axis direction; *x* is *x* axis direction.

### Simulated and Designed Structure

Waveguide structure designed in this research and analysis is less complex as compared to the structure designed by the researchers earlier for high gain and low side lobes. No additional component is incorporated in the waveguide structure which makes waveguide structure robust and less complex as shown in Fig. 4. This type of waveguide structure is very well suited for aircrafts, ships & submarines to tolerate the roll of aircraft or ship.

If slots are cut into the walls, current flow is affected more or less depending on the location of a slot. Slots *B* and *C* cause little disruption to current distribution and produce less or no radiation. Slots *A* and *D* create barriers for current flow hence radiation occurs. Working of slot can be explained using Babinet's Principle. It relates the radiated fields and impedance of slot antenna to that of the field of a dipole antenna. The fields of the slot antenna are the same as in the dipole antenna but the field components are interchanged. As vertical slots alter the current flow, the higher radiation is obtained for vertical slots but with the gain cross-polarization component also increases simultaneously. Hence, an inclination of 45° is given to the slots so that the altered current will have two components: a vertical and a horizontal. Inclination of the adjacent slots is kept opposite to each other so that vertical component gets cancelled and horizontal component gets added and helps in achieving high gain.

Side lobes are undesirable. They are produced due to the diffraction effects in the air. Diffraction occurs in the antenna array due to sharp edges. When the edges end abruptly, diffraction effects are produced. One can minimize these effects by softening edges of the antenna array. Hence, in the designed model, slots are extended with

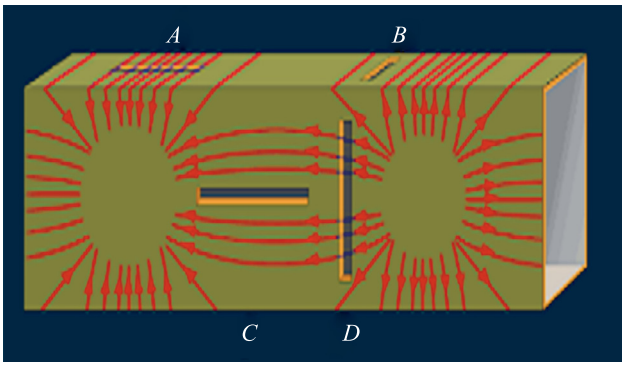



*Fig. 4*. Typical slots over rectangular waveguide:

*A* — horizontal slot in narrow wall; *B* — vertical slot in narrow wall; *C* — horizontal slot in broad wall; *D* — vertical slot in broad wall

semicircular cutting. These semicircular cutting softens the edges and minimizes diffraction effects. This reduction in diffraction effects results in reduction of the cross-polarization component of electromagnetic wave. Hence, average power distributed in all the directions decreases and gain in the desired direction of the target increases. Gain $G$ of the waveguide is calculated using the formula

$$G = E_{\text{ant}} D,$$

where $D$ is directivity of the antenna; $E_{\text{ant}}$ is the antenna efficiency. The formula for directivity is shown here as denominator component which represents the average power radiated over all the directions. The expression is the ratio of the peak value of the radiated power to the average power radiated over all the directions. Thus, with decrease in the average power distributed over all the directions, the gain of the antenna increases. Directivity $D$ of the antenna is

$$D = \frac{1}{\frac{1}{4}\int_0^{\pi}\int_0^{2\pi} |F(\theta, \varphi)^2|},$$

where θ is azimuth angle; φ is elevation angle; $F$ is normalized radiation pattern.

By adding semicircular radius cutting of 1.2 mm to the slot, diffraction is reduced. Hence, average power distributed over all the directions is reduced. As denominator component decreases, directivity increases. Improved directivity helps in achieving high gain. To achieve high gain for the antenna array, the directivity should be increased and it can be increased by increasing the effective area of the array given by the expression.

$$Ae = \left(\frac{\lambda^2}{4\pi}\right) D,$$

where $Ae$ is effective area of the array; λ is wavelength.

In the designed structure, slots are extended to the broad walls increasing the resonant length of the antenna. This increase in the length increases effective area of the array which helps to improve directivity of the antenna. Improved directivity results in higher gain of the designed slotted waveguide. These expressions allow us to estimate the increase in the amplification of the fundamental radiation and the suppression of its cross-polarization component. Rodrigi Keinj Enjio [2] designed a slotted waveguide using a WR90 waveguide with inclined slots in narrow wall having 12 slots (without semicircular cutting in the end of the slots) and achieved gain of 16 dB with cross-polarization component of around 13 dB and side lobe level of –21.9 dB.

The expression for the effective area of array helps in discrediting the surface with initial conditions:

1) Gain > 16 dB
2) Polarization: Horizontal
3) Frequency = 9 GHz
4) Scanning beam should be narrow in azimuth plane and wider in elevation plane to compensate the roll of the ship.

To have a narrow beam in azimuth plane and wider beam in elevation plane horizontal polarization is required. Slots are etched in the narrow wall to get the horizontal polarization. For fundamental TE10 mode, longitudinal slots etched in the broad wall generate vertical polarization. Transverse slots etched in narrow wall produce horizontal polarization.

Designed model is very well suited for the application involving TE10 mode of the electromagnetic wave propagation. Slots are designed for three waveguides in such a way that the induced current flows from the top wall of the waveguide to narrow wall of the waveguide vertically, and the slots are etched in one of the narrow walls. These slots alter the current flow and result in radiation into the air. Radiated power by the slot is a function of angle phi by which the slot is rotated. In this design, the slot is rotated at the angle of 45°, therefore radiated power will be function of sin45°. Radiation from the $z$ component of waveguide will be responsible for output gain and radiation characteristics, whereas $x$ component will get distributed and results in cancelling out the radiation. Waveguide is fed by a coaxial feed from one end, and other end is short circuited. The last slot is at a distance of λ/4 from the short-circuited end of the waveguide whereas distance between the slots is λ/2. Calculated slot distance is 24.35 mm and the last slot distance from the short-circuited end is 12.18 mm. Width of the slot is calculated as 2.4 mm. Pencil type of beam is obtained from this waveguide structure.

Waveguide structure is designed using a copper plate with thickness of 1.25 mm, the length of the designed waveguide is 22.86 mm and the width of the waveguide is 10.16 mm as shown in Fig. 5. The hardware is designed for the array of 10 slots and one end of the waveguide is short circuited by the copper plate and the other end is closed by epoxy with coaxial feed to transmit X-band frequency ranging from 8 to 12 GHz and analyzed on VNA.

A bridge circuit is used to transmit and receive the electromagnetic waves in TE10 mode of operation and to analyze the co- and cross-polarization component of the wave. The designed structure shown in Fig. 6 is simulated as well as tested on hardware for the 10 slots array but only for the four- and two-slot structure simulation is carried out. Results of the 10-slot array model are compared for both

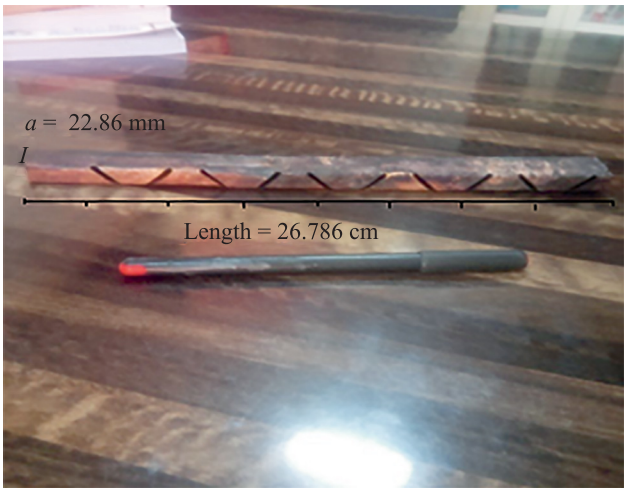



*Fig. 5*. Designed waveguide with 10 inclined slot



*Fig. 6*. Designed waveguide with semicircular slots in broad wall

simulation and hardware model. Slots are etched using CNC machine with precise measurement in the workshop. The designed hardware model is tested in the laboratory on VNA machine.

## Results and Discussion

Simulation is carried out for the structures designed for two & ten slots. Simulation results obtained for the structure show that the designed waveguide radiates at 9 GHz and the radiation gain obtained is 18 dB with side lobe level of 15 dB. Here side lobe levels are quite high. This should be reduced by increasing the array gain of the structure to the optimum level.

As the number of slots is increased, gain of the waveguide increases due to array of slots as shown in Fig. 7; they all radiate and transmit electromagnetic waves towards the target. The maximum gain obtained for the narrow wall slotted waveguide with two inclined slots without semicircular cutting extending to the broad wall is 10 dB. This number of slots also causes cross-polarization component of the waveguide to increase. Cross-polarization component increases the side lobe levels which cause polarization of the radiated energy and this is not suitable for the waveguide operating as radar antenna in ships, aircrafts or submarines.

Simulation is carried out for 10-slot structures of the waveguide. Return loss, gain and side lobed levels are calculated. Co-polarization & cross-polarization components are determined by simulating the structure with last slot at a distance of 12.18 mm from the short-circuited end of the waveguide as shown in Fig. 8.

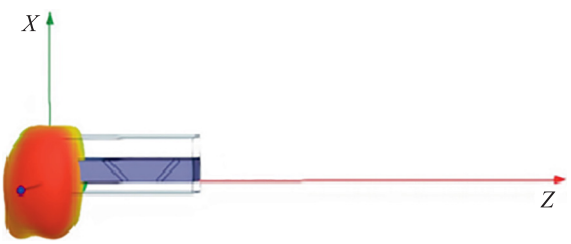



*Fig. 7*. HFSS simulation for two inclined slots in the waveguide

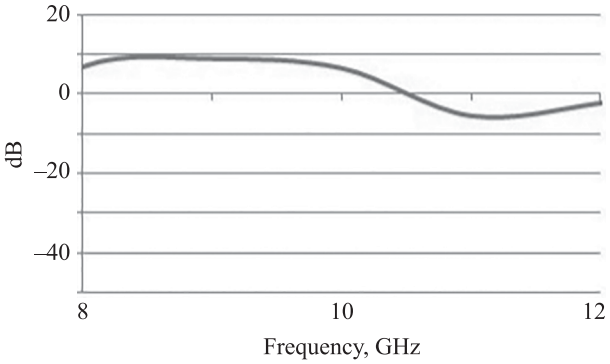



*Fig. 8*. HFSS result for gain of two inclined slots in narrow wall (without semicircular cutting)

The length of the slots is extended into the broad walls of the waveguide in both upper and bottom plate which increases the resonant length of the antenna. The length without extension is 14.35 mm, and after extension slot length increases to 16.35 mm which helps in achieving higher gain as shown in Fig. 9. Semicircular cutting in the broad walls also keeps the cross-polarization component low. With low cross-polarization component the side lobe levels are also low. This makes it possible to get the high gain keeping side lobe level at minimum.

With 10 slots HFSS shows good result for the gain. Simulation results for the co-polarization & cross-polarization components show gain of 26 dB and cross-polarization component – around 20 dB as shown in Fig. 10. The beam is obtained in X–Z plane at 90 for the wave propagating with the frequency of around 9 GHz.

Maximum gain obtained for 10 slots without semicircular cutting extended to the broad wall is 13 dB. Radar is an important component of modern navigation and radar antennas. It needs to be designed for the exact specifications. Antennas used on ships need to be of high gain with tightly controlled beam width. Antenna should be robust, compact, and resistant to the effects of roll and motion. Designed slotted waveguide antenna matches all these criteria. Fig. 11 shows the simulation results obtained for the gain of the waveguide antenna without semicircular cutting. The maximum gain achieved is 13 dB at resonant frequency of 9 GHz, whereas Fig. 12 shows the simulation results obtained for the waveguide antenna with semicircular cutting. The maximum co-polarization gain achieved is 26 dB. This value is almost double to the gain obtained without semicircular cutting.

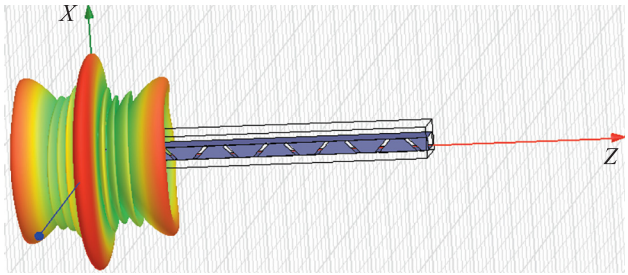



*Fig. 9*. Waveguide designed for ten slots

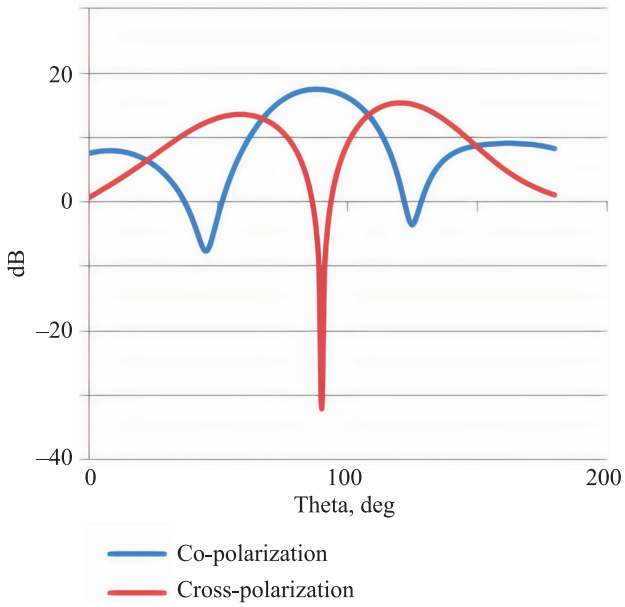



*Fig. 10*. HFSS simulation result for two inclined slots in narrow wall (with semicircular cutting)

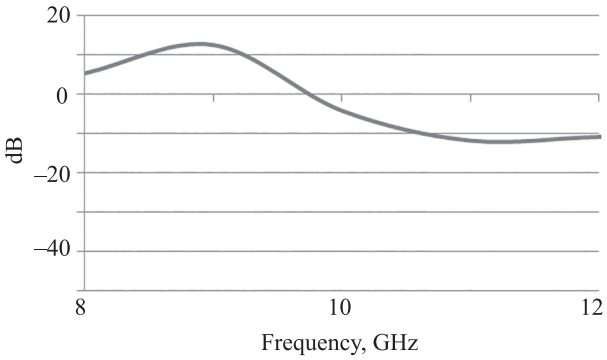



*Fig. 11*. HFSS result for ten inclined slots in narrow wall without semicircular cutting

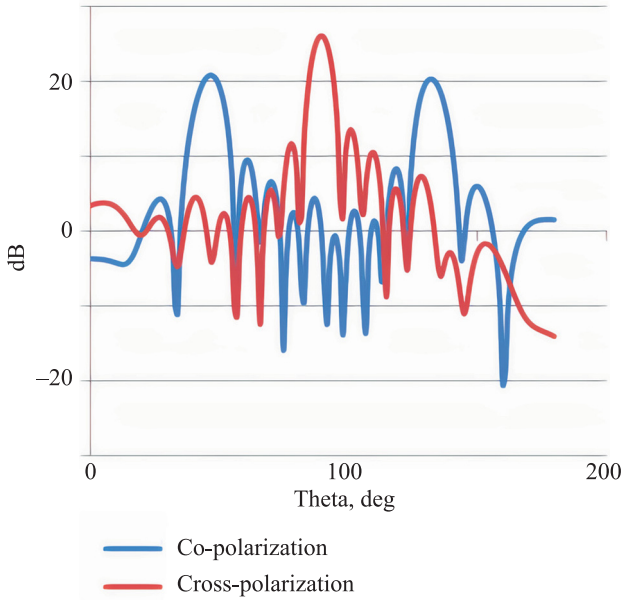



*Fig. 12*. HFSS result for 10 inclined slots in narrow wall (with semi-circular cutting)

Simulation results are compared with the hardware results measured using VNA as shown in Fig. 12. Hardware prepared according to the designed and simulated structure in the workshop is tested in the laboratory for the X-band frequency from 8 to 12 GHz using a bridge circuit which allows both input and output wave to pass through it without interfering. VNA provides insight of the microwave waveguide. It helps in analyzing cross-polarization component, side lobe level, gain in the direction of target, and voltage standing wave ratio of the waveguide. Results obtained from vector network analyzer for X-band frequency, ranging from 8 to 12 GHz for TE10 mode of operation, are compared with the simulation results obtained from ANSYS HFSS.

HFSS results for the simulation and calculated results on vector network analyzer shown in Fig. 13 are compared. The simulation results seemed to be promising after comparison with the actual hardware results. Simulation results show the maximum gain of 26 dB with side lobe level of around 20 dB for the designed waveguide array of 10 slots. Hardware results obtained from vector network analyzer give the maximum gain of 24.5 dB with the side lobe level of 18 dB. The results prove that the designed structure provides optimum gain for the structure which can be effectively utilized in the aircraft, maritime radar, having robust and compact model with low side lobe level.

Horn antenna is used for receiving the signal transmitted by the waveguide antenna. With the help of horn antenna, receiving signal gain and radiation pattern for co- and cross-polarization is calculated. Slots etched in WR90 waveguide are extended in broad wall by 2 mm and the shape of these extended slots is kept semicircular in order to get the higher gain and reduced co-polarization component. We could achieve higher gain in comparison with previous research made work by researchers [1] where authors could achieve gain of 23 dB by adding two waveguides with the help of a flange connector. Each waveguide has 32 slots and the combined structure has total 64 slots. The

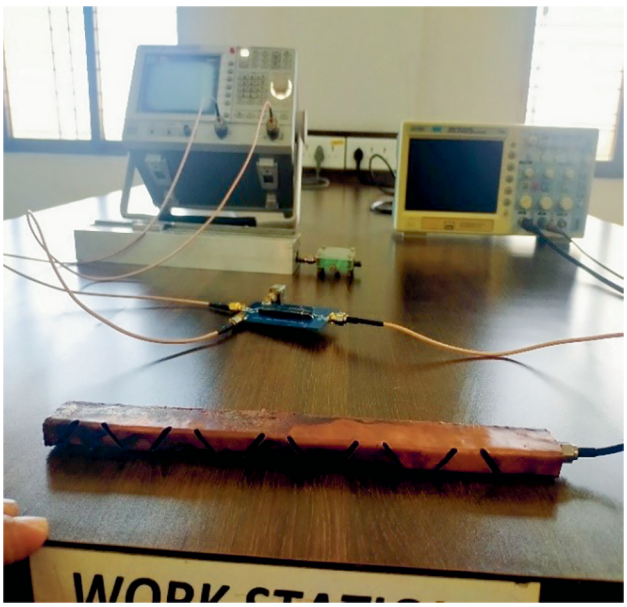


*Fig. 13*. Hardware model analysis experimental setup

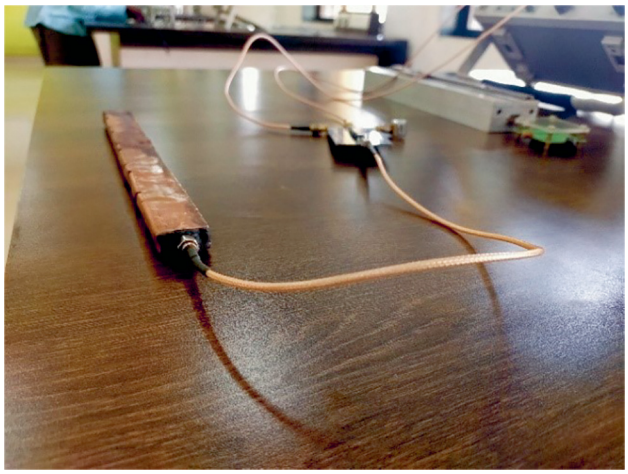


*Fig. 14*. Gain measurement using bridge circuit

construction looks bulky, has increased complexity and decreased reliability to employ it effectively in aircrafts or submarines.

Semicircular shape of these slots increases radiation by altering the current flow, thereby increasing the gain of the antenna in desired direction, while reducing the gain in the side lobes of the antenna. Radar system needs the antenna with highly directional characteristics having high gain in the direction of the target location and small amount of energy should be radiated in all other directions. Radiation pattern of the antenna in Fig. 15 above shows evidence of the goal achievement. Main lobe of the antenna shows the gain of around 26 dB while side lobes are below 20 dB. Width of the slot is calculated as 2.4 mm and spacing between the nearby slots is calculated as 24.35 mm. Waveguide is short circuited at one end and the gain is calculated at the 90°. The distance of the first slot from the short-circuited end is calculated as 12.18 mm.

The structure is designed using copper metal plate with the thickness of 1.25 mm. In the first designed structure, slots are etched in the one of the narrow wall side of the antenna. 2 mm of length is extended in the inclined slot which causes it to extend in the broad side wall of the waveguide. This increase in the inclined slot length increases resonant length and helps in achieving higher gain, and semicircular shape keeps the cross-polarization component low and reduced side lobe levels. Fig. 16 shows 3D radiation pattern in HFSS.

Fig. 17 shows hardware model experimental result for co-polarization and cross-polarization gain. Slotted waveguide narrow wall antenna was designed and simulated by researchers in [1]. After simulating the radiation pattern in CST simulation software, they found that by adding two waveguides with 32 slots in narrow wall the combined structure will have 64 slots. They designed three narrow wall waveguides and combined the waveguide with and without flange connectors. The authors simulated these three structures in CST simulation software and analyzed their radiation characteristics. The maximum they could achieve by combining two waveguides with total 64 slots was 23 dB. They analyzed the effect of flange connector on the radiation pattern and observed that the gain increases by adding two waveguides but the impact of flange connector causes side lobe level to increase.

Electromagnetic field distribution of the designed waveguide using HFSS is shown in Fig. 18. The HFSS system of electrodynamics modeling is used effectively to get the E-Field and H-Field distribution. The gain of the waveguide is increased which is not suitable for the waveguide as it increases the false detection rate of the target. Primary antenna was designed by etching 64 slots and its radiation pattern was analyzed. The use of flange connector makes the system bulky, less robust and also complex in terms of installation and maintenance as compared to the designed structure. Designed waveguide structure does not include any extra component like flange connector or reflector which makes the designed waveguide compact, robust, and can easily tolerate the roll of the aircraft or ship. Gain of 26 dB in simulation and gain of 24.5 dB in hardware is achieved with side lobe level of 20 dB in simulation and 18 dB for the hardware model. It seems to be better than the designed slotted narrow wall waveguide of the researchers in [1]. The designed structure

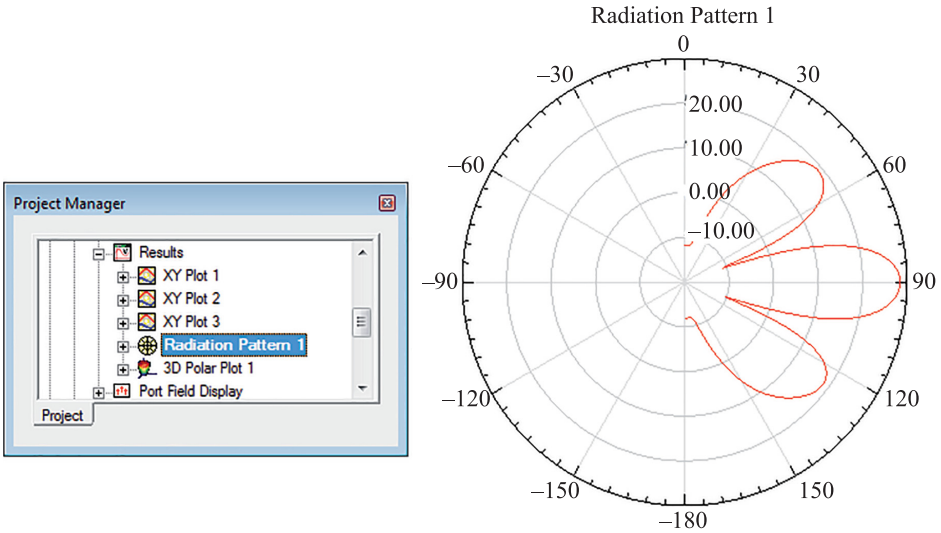



*Fig. 15*. Radiation pattern in HFSS

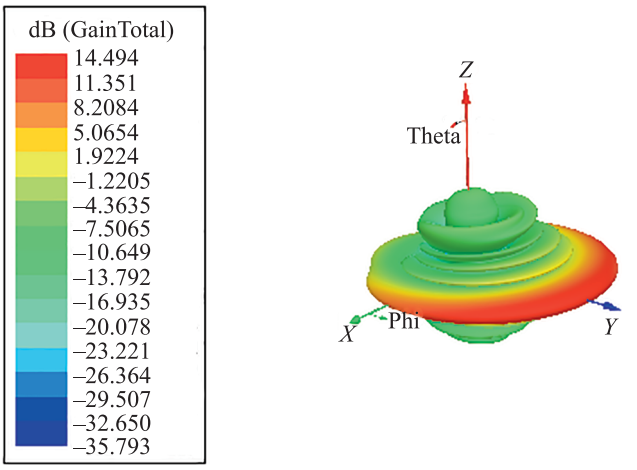



*Fig. 16*. 3D radiation pattern in HFSS

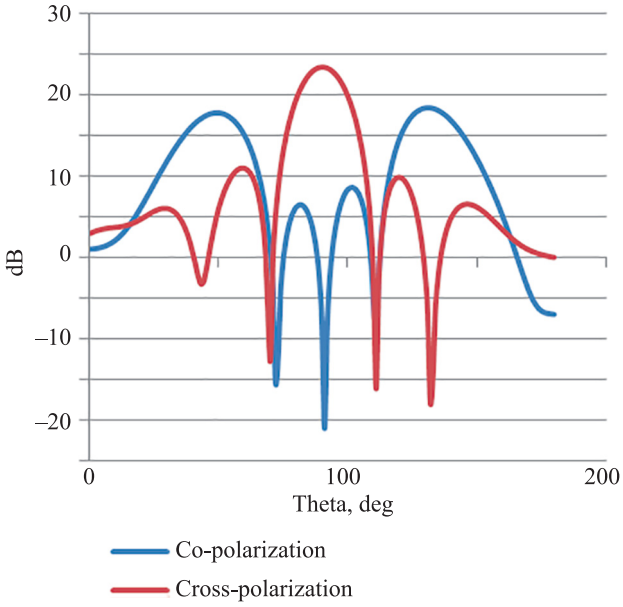



*Fig. 17*. Hardware model experimental result for co-gain & cross-polarization gain

shows multiple advantages as compared to the previous simulations presented and the models proposed.

Researchers had proposed a waveguide with slots etched in the broad wall and added a reflector to get the higher gain. They made 16 slots in the broad wall of the waveguide and a reflector was used along with the waveguide structure. This arrangement was simulated in HFSS. The authors transmitted TE10 electromagnetic wave through broad wall of the slotted WR90 waveguide structure. They found radiation pattern in simulation software and got the gain of 22.5 dB. The structure was simulated for the frequency of 9.4 GHz and the polarization utilized was horizontal. By adding the reflector, gain was increased to 22.5 dB. They simulated the structure with and without reflector and found that the use of reflector increases the gain of the waveguide but, along with the gain, side lobe level also increases. The gain of the waveguide without reflector was calculated as 16 dB and by incorporating reflector gain increases to 22.5 dB. The designed structure shows the good gain as compared to the slotted waveguide without using reflector which makes the arrangement complex and costly as well. The design structure provides cost effective way to achieve higher gain and reduce the probability of false target detection [3].

Researchers [4] worked on the Planar Structure of the waveguide and formulated several branch feed waveguide structures and calculated weight of the element by incorporating Taylor's aperture. They compared the calculated and simulated results. They calculated the gain in the Taylor's aperture in E plane by transmitting electromagnetic wave of 9.37 GHz [4]. The designed waveguide, along with the branch feed waveguide, was simulated in the Microwave CST Software and its return loss, radiation pattern, far field and near field patterns are analyzed; the gain of 25 dB was achieved. They represented the feed current of the designed structure in simulation and showed that as the feed point is moved away from the center of the structure then surface current starts decreasing.

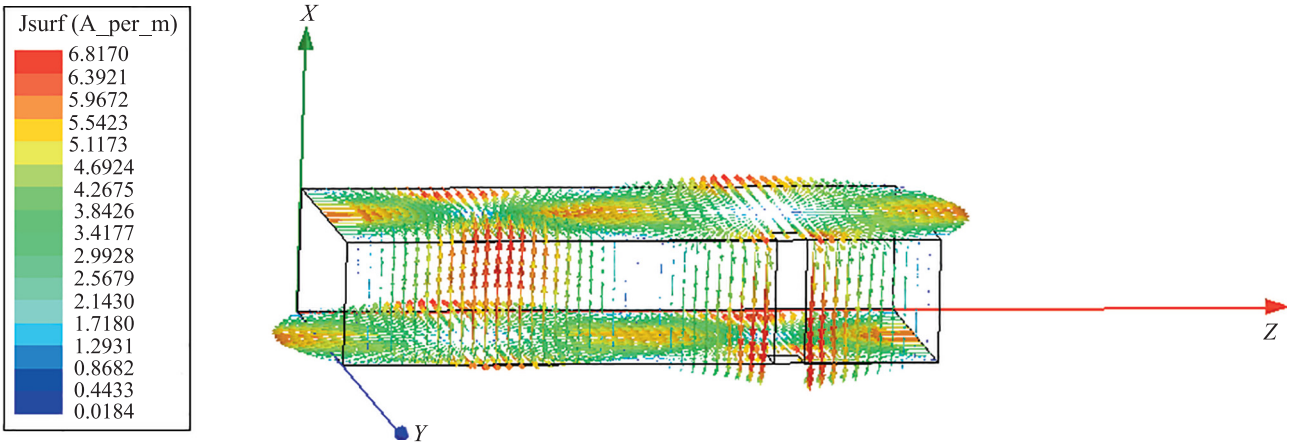



*Fig. 18*. Software simulation model of electromagnetic fields (using HFSS)



*Fig. 19*. Gain measurement for the hardware

The designed simulated structure is fabricated in the workshop and tested in the laboratory for the evaluation of the simulation results. The designed slotted waveguide is tested for the gain and cross-polarization component by using a VNA.

Horn antenna is used for receiving the signal transmitted by the waveguide antenna as shown in Fig. 19. With the help of horn antenna receiving signal gain and radiation pattern for co- and cross-polarization is calculated. Slots etched in WR90 waveguide are extended in broad wall by 2 mm and shape of these extended slots is kept semicircular in order to get the higher gain and reduced co-polarization component.

We could achieve higher gain in comparison with previous research work by researchers [1] who could achieve gain of 23 dB by adding two waveguides with the help of a flange connector, each waveguide having 32 slot and combined structure have total 64 slots. This makes it bulky, increases its complexity and decreases reliability to employ it effectively in aircrafts or submarines.

## Conclusion

Simulation results for the designed models of 2 and 10 inclined slots in the narrow wall of the waveguide antenna provide the gain of 18 dB and 26 dB respectively. The result is better as compared to the proposed models by earlier researchers. Advantage of the designed model is that it does not incorporate any additional device like reflector or flange connector which makes the structure robust and increases its reliability. The designed structure is cost-effective and less complex, so it can be effectively used as a radar antenna for aircrafts and ships. Hardware model analysis provides the gain of 24.5 dB and verifies the simulation results.

## References


1. Lubis M.A., Yusuf D.P., Apriono C., Rahardjo E.T. The effect of flange connectors on the radiation performance of narrow wall slotted waveguide antenna at X-band frequency. *Proc. of the International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP)*, 2017, pp. 1–2. https://doi.org/10.1109/ISANP.2017.8228980
2. Enjiu R.K., Perotoni M.B. Slotted waveguide antenna design using 3D EM simulation. *Microwave Journal*, 2013, vol. 56, no. 7, pp. 72–84.
3. Murugaveni S., Karthik T. Design of slotted waveguide antenna for radar applications at X-band. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 2014, vol. 3, no. 11.
4. Salimi M., Gheitarani Sehrigh S., Rajebi S. Design and analysis of Microstrip Patch Antenna for hyperthermia applications in breast cancer. *International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering (IJTPE)*, 2019, issue 41, vol. 11, no. 3, pp. 71–76.
5. Villeneuve T. Taylor patterns for discrete arrays. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1984, vol. 32, no. 10, pp. 1089–1093. https://doi.org/10.1109/TAP.1984.1143212
6. Johannes A., Maritz N. *Investigation and Design of a Slotted Waveguide Antenna with Low 3D Sidelobes*. Thesis. Stellenbosch University, 2010.
7. Hashimov A.M., Huseyn R.N. Modelling of Electromagnetic wave processes taking into account reactors with ungrounded neutrals and ovls in double-circuit long-distance ETL. *International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering (IJTPE)*, 2019, issue 41, vol. 11, no. 4, pp. 81–88.
8. Derneryd A.G., Lagersted A. Novel slotted waveguide antenna with polarimetric capabilities. *Proc. of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. Vol. 3, 1995, pp. 2054–2056. https://doi.org/10.1109/IGARSS.1995.524106
9. Gemnani S.K., Chowdhry B.S. Wide band square patch microstrip antenna design for WLAN and WiMAX application. *International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering (IJTPE)*, 2016, issue 27, vol. 8, no. 2, pp. 46–52.


## Литература


1. Lubis M.A., Yusuf D.P., Apriono C., Rahardjo E.T. The effect of flange connectors on the radiation performance of narrow wall slotted waveguide antenna at X-band frequency // Proc. of the International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP). 2017. P. 1–2. https://doi.org/10.1109/ISANP.2017.8228980
2. Enjiu R.K., Perotoni M.B. Slotted waveguide antenna design using 3D EM simulation // Microwave Journal. 2013. V. 56. N 7. P. 72–84.
3. Murugaveni S., Karthik T. Design of slotted waveguide antenna for radar applications at X-band // International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT). 2014. V. 3. N 11.
4. Salimi M., Gheitarani Sehrigh S., Rajebi S. Design and analysis of Microstrip Patch Antenna for hyperthermia applications in breast cancer // International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering (IJTPE). 2019. Is. 41. V. 11. N 3. P. 71–76.
5. Villeneuve T. Taylor patterns for discrete arrays // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 1984. V. 32. N 10. P. 1089–1093. https://doi.org/10.1109/TAP.1984.1143212
6. Johannes A., Maritz N. Investigation and Design of a Slotted Waveguide Antenna with Low 3D Sidelobes: Thesis. Stellenbosch University, 2010.
7. Hashimov A.M., Huseyn R.N. Modelling of Electromagnetic wave processes taking into account reactors with ungrounded neutrals and ovls in double-circuit long-distance ETL // International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering (IJTPE). 2019. Is. 41. V. 11. N 4. P. 81–88.
8. Derneryd A.G., Lagersted A. Novel slotted waveguide antenna with polarimetric capabilities // Proc. of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. V. 3. 1995. P. 2054–2056. https://doi.org/10.1109/IGARSS.1995.524106
9. Gemnani S.K., Chowdhry B.S. Wide band square patch microstrip antenna design for WLAN and WiMAX application // International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering (IJTPE). 2016. Is. 27. V. 8. N 2. P. 46–52.

10. Wang W., Jin J., Lu J.G., Zhong S.S. Waveguide slotted antenna array with broadband, dual-polarization and low cross band SAR applications. *Proc. of the IEEE International Radar Conference (RADAR)*, 2005, pp. 653–656. https://doi.org/10.1109/RADAR.2005.1435907
11. Hashemi-Yagnesh S., Elliott R.S. Analysis of untilted edge slots excited by tilted wires. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1990, vol. 38, no. 11, pp. 1737–1745. https://doi.org/10.1109/APS.1989.135008
12. Stangl M., Werninghaus R., Zahn R. The TERRASAR-X active phased array antenna. *Proc. of the 6th IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology*, 2003, pp. 70–75. https://doi.org/10.1109/PAST.2003.1256959
13. Bisht S., Saini S., Prakash V., Nautiyal B. Study the various feeding techniques of microstrip antenna using design and simulation using CST microwave studio. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering (IJETAE)*, 2014, vol. 4, no. 9, pp. 318–324.
14. Clauzierc S.M., Mikki S.M. A new method for the design of slot antenna arrays: Theory and experiment. *Proc. of the 10th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, 2016, pp. 7481401. https://doi.org/10.1109/EuCAP.2016.7481401
15. Balanis C.A. *Antenna Theory. Analysis and Design*. Fourth Edition. John Wiley & Sons, Inc, 2016, 1104 p.
16. Christodoulou C.G., Wahid P.F. *Fundamentals of Antennas: Concepts and Applications*. SPIE Press, 2001. https://doi.org/10.1117/3.416262

10. Wang W., Jin J., Lu J.G., Zhong S.S. Waveguide slotted antenna array with broadband, dual-polarization and low cross band SAR applications // Proc. of the IEEE International Radar Conference (RADAR). 2005. P. 653–656. https://doi.org/10.1109/RADAR.2005.1435907
11. Hashemi-Yagnesh S., Elliott R.S. Analysis of untilted edge slots excited by tilted wires // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 1990. V. 38. N 11. P. 1737–1745. https://doi.org/10.1109/APS.1989.135008
12. Stangl M., Werninghaus R., Zahn R. The TERRASAR-X active phased array antenna // Proc. of the 6th IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology. 2003. P. 70–75. https://doi.org/10.1109/PAST.2003.1256959
13. Bisht S., Saini S., Prakash V., Nautiyal B. Study the various feeding techniques of microstrip antenna using design and simulation using CST microwave studio // International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering (IJETAE). 2014. V. 4. N 9. P. 318–324.
14. Clauzierc S.M., Mikki S.M. A new method for the design of slot antenna arrays: Theory and experiment // Proc. of the 10th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). 2016. P. 7481401. https://doi.org/10.1109/EuCAP.2016.7481401
15. Balanis C.A. Antenna Theory. Analysis and Design / Fourth Edition. John Wiley & Sons, Inc, 2016. 1104 p.
16. Christodoulou C.G., Wahid P.F. Fundamentals of Antennas: Concepts and Applications. SPIE Press, 2001. https://doi.org/10.1117/3.416262

## Authors

**Pathan Riyaz** — PhD Student, M.Eng., Research Scholar, Amity University, Jaipur, 303002, India; Assistant Professor, Anjuman-I-Islam's Kalsekar Technical Campus (AIKTC), Navi Mumbai, 410206, India, https://orcid.org/0000-0002-7012-7731, Riyazp4@gmail.com

**Tripathi Ashutosh** — PhD, Associate Professor, Chandigarh University, Chandigarh, 140413, India, Sc 56583449800, https://orcid.org/0000-0003-3709-9182, Ashu20034@gmail.com

## Авторы

**Рияз Патхан** — аспирант, магистр, исследователь, Университет Амити, 303002, Джапур, Индия; доцент, Технический кампус Калсекар Мумбайского университета (AIKTC), Нави-Мумба́и, 410206, Индия, https://orcid.org/0000-0002-7012-7731, Riyazp4@gmail.com

**Ашутош Трипати** — PhD, доцент, Университет Чандигар, Чандигар, 140413, Индия, Sc 56583449800, https://orcid.org/0000-0003-3709-9182, Ashu20034@gmail.com

*Received 21.11.2021*
*Approved after reviewing 04.05.2022*
*Accepted 29.05.2022*

*Статья поступила в редакцию 21.11.2021*
*Одобрена после рецензирования 04.05.2022*
*Принята к печати 29.05.2022*

Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»

Уважаемые подписчики научно-технической литературы!

Журнал выходит 6 раз в год.

На журнал «Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики» можно оформить подписку в почтовых отделениях по объединенному каталогу «Пресса России», подписные индексы 47197 (полугодовая подписка),

а также online
по объединенному каталогу «Пресса России» и по каталогу «Пресса по подписке»,
подписные индексы Э47197 (полугодовая подписка)
и по электронному каталогу Почты России, подписной индекс ПС543.

Корпоративная подписка и подписка физических лиц возможна
по каталогу компаний «Урал-Пресс»,
подписные индексы 47197 (полугодовая подписка) и 70522 (годовая подписка).

Сведения о подписке можно уточнить в редакции журнала по адресу:

Санкт-Петербург, ул. Ломоносова., д.9, литера А, комн. 2136.

Тел.: +7(812) 480 02 75

## ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ

Журнал публикует научные обзоры, полнотекстовые статьи и краткие сообщения.

Полнотекстовая статья должна иметь четкую структуру, включающую в себя аннотацию, ключевые слова, введение, несколько содержательных разделов и заключение.

В аннотации, рассчитанной на самый широкий круг читателей, необходимо в объеме 200–400 слов в форме краткого реферата (Abstract) изложить научное содержание статьи: предмет, цель работы, метод или методология проведения работы, краткое описание эксперимента, полученные результаты, рекомендации по их применению.

Ключевые слова должны отражать информацию, представленную в статье. Основное ключевое слово указывается первым.

Во введении необходимо представить содержательную постановку рассматриваемого вопроса, провести краткий анализ известных из научной литературы решений (со ссылками на источники), дать критику их недостатков, показать научную новизну и преимущество (особенности) предлагаемого подхода.

В основном тексте статьи должна быть представлена строгая постановка решаемой задачи, изложены и обстоятельно разъяснены (доказаны) полученные утверждения и выводы, приведены результаты экспериментальных исследований или математического моделирования, иллюстрирующие сделанные утверждения. Основной текст статьи должен быть разбит на содержательные разделы (2–3 раздела).

В заключении необходимо кратко сформулировать основные результаты, прокомментировать их и, если возможно, указать направления дальнейших исследований и области применения.

Пристатейный список литературы (рекомендуется): для обзорной статьи — не менее 50, для полнотекстовой статьи — не менее 15, для краткого сообщения — не менее 8 литературных источников.

Ссылки на стандарты и иные нормативные документы, а также на неперсонифицированные интернет-ресурсы в список литературы не вносятся, а оформляются в виде сносок.

Объем обзорной статьи предварительно согласовывается с редакцией.

Объем полнотекстовой статьи, включая иллюстрации, таблицы и список литературы, не должен превышать 8 страниц машинописного текста (с рисунками и таблицами), шрифт 12 pt, один интервал.

Объем краткого сообщения — до 3 страниц, шрифт 12 pt, один интервал. Рубрикация текста не требуется. Статьи принимаются в электронном виде (ntvitmo@itmo.ru). В распечатанном виде с подписями авторов материалы представляются в редакцию по запросу редакции после прохождения процедуры рецензирования.

Комплект документов должен включать:

- текст статьи с заверстанными рисунками и таблицами;
- формы сведений об авторах (на каждого автора); допускается указание нескольких мест работы автора;
- файлы с рисунками к статье в оригинальном формате (предпочтительно JPEG) с максимальным разрешением; допускается представление цветных рисунков, если в черно-белом варианте теряется полезная информация;
- лицензионное соглашение;
- согласие на обработку персональных данных.

## REQUIREMENTS FOR EXECUTION OF PAPERS

Scientific reviews, full-text and brief papers are published.

A full-text paper should have a well-defined structure, including an abstract, keywords, introduction, several substantive chapters and a conclusion.

An abstract is intended for general public. It is necessary to set forth the scientific content of the paper limited by 200–400 words in the form of a brief abstract: the subject, the work objective, the method or methodology of work, a brief description of the experiment, obtained results, recommendations for their application.

Keywords should be connected with the information presented in the paper. The main keyword is given first.

The introduction should contain a meaningful statement of the issue in question, a brief analysis of the solutions known from scientific literature (with references to sources), a criticism of their shortcomings, scientific novelty and advantages (features) of the proposed approach.

The main body of the paper should represent exact statement of the problem being solved, obtained assertions and conclusions are to be set forth and explained in detail (proved), the results of experimental studies or mathematical modeling should be given to illustrate the statements made. The main text of the paper needs to be split up into meaningful sections (2–3 sections).

In conclusion it is necessary to summarize the main results, comment on them and, if possible, to indicate the areas of future research and application.

A list of references is recommended: for a review paper — at least 50 items, for full-text paper — not less than 15, for a brief paper — at least 8 references. References to standards and other regulatory documents, as well as to Internet resources, are not included in a reference list and are documented as footnotes.

The length of a review paper is coordinated with the editorial board beforehand.

The length of a full-text paper, including illustrations, tables and references, should not exceed 8 pages of typewritten text (figures and tables included), font 12 pt, single-spaced.

The length of a brief paper is up to 3 pages, font 12 pt, single-spaced.

No rubrication is required.

Papers are accepted in electronic form (ntvitmo@itmo.ru).

Materials are submitted to the editors on request after the procedure of reviewing in a printed form signed by the authors.

A set of documents should include:

- The text of the paper with make-up figures and tables;
- The forms with information about the authors (for each author), several employers can be specified by the author;
- Files with pictures to the paper in their original format (preferably JPEG) with the maximum resolution; should useful information is lost in the black and white variant, color drawings are permitted;
- Publishers license agreement;
- Consent to the processing of personal data.

SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL OF ITMO UNIVERSITY

# INFORMATION TECHNOLOGIES, MECHANICS AND OPTICS

2022, VOLUME 22, NUMBER 3 (MAY–JUNE) ISSN 2226-1494 (PRINT), 2500-0373 (ONLINE)

**REVIEW PAPER**

Methods for audiovisual recognition of people in masks — *Kosulin K.E., Karpov A.A.* — 415

**OPTICAL ENGINEERING**

Influence of the ratio of the intensities of the reference and object waves on the intensity distribution in the holographic field — *Koreshev S.N., Starovoitov S.O.* — 433

High-precision fiber-optic temperature sensor based on Fabry-Perot interferometer with reflective thin-film multilayer structures — *Moor Ia.D., Konnov K.A., Plotnikov M.Yu., Volkov A.V., Varzhel S.V., Konnov D.A., Strigalev V.E.* — 442

Optical system design method for the concentration of radiation from a high-power LED (in English) — *Romanova G.E., Qiao X., Kozlova O.K.* — 450

Detection of potholes on road surfaces using photogrammetry and remote sensing methods (review) (in English) — *Abd Mukti S.N., Tahar K.N.* — 459

**AUTOMATIC CONTROL AND ROBOTICS**

Adaptive control of nonlinear plant with unmatched parametric uncertainties and input saturation — *Pashenko A.V., Gerasimov D.N., Paramonov A.V., Nikiforov V.O.* — 472

Application of failure detection methods to detect information attacks on the control system (in English) — *Margun A.A., Iureva R.A., Kolesnikova D.V.* — 480

DC motor fault detection and isolation scheme with the use of directional residual set — *Kolesnik N.S., Margun A.A.* — 492

Synthesis and implementation of λ-approach of slide control in heat-consumption system (in English) — *Shilin A.A., Bukreev V.G., Perevoshchikov F.V.* — 501

**MATERIAL SCIENCE AND NANOTECHNOLOGIES**

Photocatalytic properties of Ag-AgBr nanostructures in ion-exchanged layers of bromide sodium-zinc-aluminosilicate glass matrix — *Marasanov D.V., Sgibnev Y.M., Nikonorov N.V.* — 509

**COMPUTER SCIENCE**

Mechanization of pomset languages in the Coq proof assistant for the specification of weak memory models — *Moiseenko E.A., Gladstein V.P., Podkopaev A.V., Koznov D.V.* — 517

Cloud-based intelligent monitoring system to implement mask violation detection and alert simulation (in English) — *Komal Venugopal V., Lalith M., Arun Kumar T., Jayashree J., Vijayashree J.* — 528

Efficient incremental hash chain with probabilistic filter-based method to update blockchain light nodes (in English) — *Maalla M.A., Bezzateev S.V.* — 538

Method for generating masks on face images and systems for their recognition — *Kukharev G.A., Ryumina E.V., Shulgin N.A.* — 547

Improving sign language processing via few-shot machine learning (in English) — *Shovkoplias G.F., Strokov D.A., Kasantsev D.V., Vatian A.S., Asadulaev A.A., Tomilov I.V., Shalyto A.A., Gusarova N.F.* — 559

Quantum-probabilistic SVD: complex-valued factorization of matrix data (in English) — *Kozhisseri S., Surov I.A.* — 567

Modelling of basic Indonesian Sign Language translator based on Raspberry Pi technology (in English) — *Fadlilah U., Prasetyo R.A.R, Mahamad A.K., Handaga B., Saon S., Sudarmilah E.* — 574

A method of multimodal machine sign language translation for natural human-computer interaction — *Axyonov A.A., Kagirov I.A., Ryumin D.A.* — 585

Web app for quick evaluation of subjective answers using natural language processing (in English) — *Meenakshi Anurag T., Pradeep B.M., Vishaka M.* — 594

**MODELING AND SIMULATION**

Substantiation of construction and evaluation ways of the application efficiency for spatially distributed system of information sensors to provide environment monitoring — *Zyuzin A.V., Knysh M.V., Razinkov S.N., Tymoshenko A.V.* — 600

Monitoring of infiltration processes in hydraulic structures using distributed acoustic sensing technology (in English) — *Timofeev A.V., Groznov D.I.* — 610

Slotted waveguide antenna design for maritime radar system (in English) — *Riyaz P., Ashutosh T.* — 623