НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ
июль–август 2025 Том 25 № 4 http://ntv.ifmo.ru/
SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL OF INFORMATION TECHNOLOGIES, MECHANICS AND OPTICS
Jule–August 2025 Vol. 25 No 4 http://ntv.ifmo.ru/en/
ISSN 2226-1494 (print) ISSN 2500-0373 (online)

ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ

OPTICAL ENGINEERING

doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-4-585-590
УДК 681.7.067.223.2

Апохроматический объектив для изображающих спектральных систем видимого, ближнего и коротковолнового инфракрасного диапазонов спектра

Михаил Петрович Поляков[1], Демид Денисович Хохлов[2]✉, Алексей Александрович Быков[3]

[1,2,3] Научно-технологический центр уникального приборостроения Российской академии наук, Москва, 117342, Российская Федерация

[1] polyakov.mp@ntcup.ru, https://orcid.org/0009-0004-3484-6466

[2] khokhlov.dd@ntcup.ru✉, https://orcid.org/0000-0003-0919-7762

[3] bykov@ntcup.ru, https://orcid.org/0000-0002-7574-3437

Аннотация

Введение. Широкое распространение спектральных и гиперспектральных методов в различных областях науки и техники требует все более высоких показателей оптического качества спектральных систем. В особенности актуальна задача повышения качества изображения для гиперспектральных систем, использующихся в методах видеоспектрометрии, так как достоверность восстановления спектральных характеристик исследуемых объектов зависит не только от диспергирующего элемента, но и от хроматических и монохроматических аберраций оптической системы. Недостаточная степень коррекции хроматических аберраций приводит к необходимости использовать в спектральной системе дополнительные программные и аппаратные средства для достоверного восстановления спектральных характеристик исследуемых объектов. Важным направлением разработки спектральных систем является поиск комбинаций марок стекол и архитектур оптических схем, которые позволят решить вышеуказанные проблемы. В рамках исследования рассмотрены существующие методы проектирования оптических систем объективов-апохроматов, поставлена и решена задача создания архитектуры оптической схемы с минимально возможным набором марок стекол, которая лишена хроматических аберраций и позволяет получать высокое качество изображения. **Метод.** В работе использованы общеизвестные методы расчета оптических схем на основе дисперсионных свойств стекла и композиции оптических систем профессора М.М. Русинова. Предварительный теоретический расчет оптической системы обеспечил формирование начальной конфигурации оптической схемы и выбор марок стекол. Оптимизация и анализ оптической системы выполнены с использованием системы автоматизированного проектирования Zemax. В ходе оптимизации начальной конфигурации оптической схемы без изменения марок стекол достигнута коррекция хроматических аберраций в диапазоне, значительно превосходящем по ширине величину, определенную при теоретическом расчете. **Основные результаты.** Рассчитана оптическая схема объектива с дифракционной степенью коррекции хроматических аберраций в широком диапазоне длин волн (0,5–2,3 мкм). Монохроматические аберрации объектива также исправлены с высокой степенью коррекции во всем рабочем спектральном диапазоне. По качеству изображения объектив является апохроматом. Конструкция объектива технологична и включает шесть линз (без асферических поверхностей) из двух марок стекол (каталог Лыткаринского завода оптического стекла). **Обсуждение.** Архитектура рассчитанной оптической схемы может быть использована как базовая при проектировании изображающих приборов спектрального анализа (гиперспектральные и мультиспектральные камеры).

Ключевые слова

объектив-апохромат, изображающая спектральная система, видеоспектрометрия, гиперспектральные и мультиспектральные камеры, коррекция хроматизма, аберрационная коррекция, качество изображения, архитектура оптической системы

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-79-10239 (https://rscf.ru/project/24-79-10239/).

Результаты работы получены с использованием оборудования Центра коллективного пользования Научно-технологического центра уникального приборостроения РАН (НТЦ УП РАН) (НТИРФ ID: 456451, https://ckp.ntcup.ru/).

© Поляков М.П., Хохлов Д.Д. Быков А.А., 2025

Ссылка для цитирования: Поляков М.П., Хохлов Д.Д. Быков А.А. Апохроматический объектив для изображающих спектральных систем видимого, ближнего и коротковолнового инфракрасного диапазонов спектра // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2025. Т. 25, № 4. С. 585–590. doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-4-585-590

Apochromatic objective for imaging spectral systems of visible, near and short-wave infrared spectrum ranges

Mikhail P. Poliakov[1], Demid D. Khokhlov[2]✉, Alexey A. Bykov[3]

[1,2,3] Scientific and Technological Centre of Unique Instrumentation of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 117342, Russian Federation

[1] polyakov.mp@ntcup.ru, https://orcid.org/0009-0004-3484-6466
[2] khokhlov.dd@ntcup.ru✉, https://orcid.org/0000-0003-0919-7762
[3] bykov@ntcup.ru, https://orcid.org/0000-0002-7574-3437

Abstract

The widespread use of spectral and hyperspectral methods across various scientific and technological fields necessitates increasingly higher optical quality of spectral systems. The challenge of enhancing image quality for hyperspectral systems employed in imaging spectrometry methods is particularly significant. The reliability of reconstructing the spectral characteristics of research objects depends not only on the dispersing element but also on the chromatic and monochromatic aberrations of the optical system. Insufficient correction of chromatic aberrations necessitates the use of additional software and hardware within the spectral system for reliable reconstruction of the spectral characteristics of research objects. Consequently, a crucial aspect of spectral systems development involves finding optimal combinations of glass types and optical scheme architectures to address these issues. The authors examined existing methods for designing optical systems of apochromatic objectives and set and solved the problem of designing the architecture of an optical scheme with the minimum possible set of glass types which is free of chromatic aberrations and allows obtaining high image quality. The study employs well-established methods for computing optical schemes based on the dispersion properties of glass and the composition of optical systems as outlined by M.M. Rusinov. Preliminary theoretical calculation of the optical design provided the initial configuration of the optical scheme and the choice of glass types. Optimization and analysis of the optical system are performed in Zemax CAD. During the optimization of the initial configuration without changing the glass types; correction of chromatic aberrations was achieved in a range significantly exceeding the width determined in the theoretical calculation. An optical scheme of an objective with diffraction-limited correction of chromatic aberrations across a broad wavelength range (0.5–2.3 μm) has been successfully developed. The objective exhibits well-corrected monochromatic aberrations across the entire operational spectral range and qualifies as an apochromat in terms of image quality. The objective design is technologically advanced, comprising six lenses (without aspherical surfaces) fabricated from two types of glass (LZOS catalog). The architecture of the developed optical scheme can serve as a foundation for designing imaging devices for spectral analysis applications, including hyperspectral and multispectral cameras.

Keywords

apochromatic objective, imaging spectral system, spectral imaging, hyperspectral and multispectral cameras, chromatic aberration correction, aberration correction, image quality, optical system architecture

Acknowledgments

The research was supported by the grant of the Russian Science Foundation No. 24-79-10239 (https://rscf.ru/project/24-79-10239/).

This work was obtained using the equipment of the Core Shared Research Facility of Scientific and Technological Centre of Unique Instrumentation of RAS (STC UI RAS) (ID: 456451, https://ckp.ntcup.ru/en/).

For citation: Poliakov M.P., Khokhlov D.D., Bykov A.A. Apochromatic objective for imaging spectral systems of visible, near and short-wave infrared spectrum ranges. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2025, vol. 25, no. 4, pp. 585–590 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-4-585-590

Введение

Развитие спектральных методов, в том числе изображающей спектрометрии (видеоспектрометрии), и их широкое распространение в различных областях науки и техники [1–5] требует от спектральных систем все более высоких показателей оптического качества, а именно, пространственной и спектральной разрешающей способности. В изображающих спектральных системах достоверность восстанавливаемых по набору спектральных изображений спектральных характеристик зависит не только от свойств диспергирующего элемента, но и от хроматических аберраций, вносимых оптической системой. Наличие хроматизма положения в оптической системе влияет на качество изображения отдельных спектральных кадров и для достоверного восстановления спектральной характеристики требует перефокусировки на различных длинах волн. Наличие хроматизма увеличения и высших порядков хроматических аберраций влияет на масштаб спектральных кадров в рабочем спектральном диапазоне и требует программной коррекции для достоверного восстановления спектральной характеристики исследуемых объектов. Таким образом, наличие в оптической системе хроматических аберраций усложняет как саму спектральную систему, так и ее применение в различных задачах.

Исходя из этого, важным направлением разработки спектральных систем, позволяющим расширить возможности применения спектральных методов, является создание оптических систем с минимизированными хроматическими аберрациями и обладающих близким к дифракционному качеством изображения, что позволит им работать в широком спектральном диапазоне без использования дополнительных средств программной и аппаратной коррекции. Одновременно с этим, немаловажным критерием качества оптических систем, использующихся в составе многоканальной спектральной аппаратуры, является их технологичность. Расширение спектрального рабочего диапазона без существенного усложнения конструкции оптической схемы обеспечивает возможность унификации оптических систем отдельных каналов.

Расчет оптической системы объектива

Известны объективы-апохроматы [6–12] и гиперапохроматы[1], обладающие великолепными оптическими характеристиками в широком диапазоне длин волн. Цель настоящей работы — попытка улучшить известные оптические схемы объективов апохроматов для их применения в задачах мультиспектральной съемки и последующего термографирования производственных процессов металлообработки с использованием математической обработки получаемых спектральных изображений. Однако расчет оптической системы привел к интересному результату.

Алгоритм расчета предложенной базовой оптической схемы включает в себя следующие этапы.

Этап 1. Подбор оптических материалов, обеспечивающих достаточную степень коррекции хроматических аберраций.

Этап 2. Формирование отправной точки для последующей оптимизации оптической системы, а именно, расположение компонентов в соответствии с принципами композиции оптических систем профессора М.М. Русинова.

Этап 3. Анализ качества изображения и оптимизация конструктивных параметров оптической системы (при необходимости проводится несколько итераций до получения приемлемых показателей качества изображения) при сохранении неизменными характеристик оптических материалов, выбранных на этапе 1.

Возможность коррекции хроматических аберраций определяется дисперсионными свойствами стекла, поэтому на этапе 1 расчета оптической системы важно выбрать марки стекол. Изначально подбор марок стекол производился для удовлетворяющей коррекции хроматических аберраций в диапазоне от 0,5 до 1,1 мкм для работы с матричными приемниками излучения (МПИ) на основе кремния по следующим формулам [13–15]:

$$\sum_{i=1}^{N} \varphi_i h_i = 1, \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^{N} \frac{\varphi_i h_i}{v_i} = 0, \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^{N} \frac{\varphi_i h_i^2 \gamma_i}{v_i} = 0, \quad (3)$$

где i — номер компонента; N — количество используемых марок стекол; $\varphi_i = \frac{v_i}{v_i - v_{i-1}}$ и $\varphi_i = \frac{v_i}{v_i - v_{i+1}}$ — относительная оптическая сила для четных и нечетных i соответственно; h_i — высота первого вспомогательного луча; $v_i = \frac{n_{1i} - 1}{n_{2i} - n_{3i}}$ — коэффициент дисперсии Аббе; $\gamma_i = \frac{n_{1i} - n_{3i}}{n_{2i} - n_{3i}}$ — относительная частная дисперсия для первой и третьей длин волн из выбранного диапазона.

Первая сумма (1) обеспечивает выполнение условия масштаба рассчитываемой оптической системы, вторая (2) и третья (3) суммы обеспечивают условие устранения хроматических аберраций – хроматизма положения и вторичного спектра, соответственно. Составив систему уравнений из уравнений (1)–(3) можно определить наиболее подходящие марки стекол, обеспечивающие необходимую степень коррекции хроматических аберраций.

Решения системы уравнений подбирались по критерию минимизации суммы модулей оптических сил компонентов рассчитываемого объектива и минимальному набору марок стекол, что обеспечивает повышенные коррекционные возможности и технологичность будущей оптической системы:

$$\Phi = \sum_{i=1}^{N} |\varphi_i| \to \min.$$

Вычисления производились с помощью программы, написанной в среде MATLAB. Решения системы уравнений были найдены уже для двух марок стекол из каталога Лыткаринского завода оптического стекла, которые при дальнейших расчетах не подвергались изменениям. Последующий расчет и оптимизация оптической системы проводились в системе автоматизированного проектирования (САПР) Zemax. Значения оптических сил отдельных компонентов, найденные из системы уравнений, были слишком большими, что усложнило бы аберрационную коррекцию, поэтому при расчете оптической системы в САПР Zemax каждый компонент был разделен на три линзы. Упрощение и ускорение поиска локального минимума оценочной функции при предварительной локальной оптимизации было обеспечено расположением линз и апертурной диафрагмы оптической системы в соответствии с принципами композиции оптических систем профессора М.М. Русинова [16]. После предварительной локальной оптимизации был введен хроматический радиус и проведена еще одна итерация оптимизации с поиском локального минимума оценочной функции. Последующий анализ оптической системы показал, что ее коррекционные возможности в части устранения хроматических аберраций куда шире, чем предполага-

[1] Гиперапохроматические объективы диапазона 0,4–1,7 мкм фирмы Computar, Япония [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://computarganz.s3.us-east-1.amazonaws.com/Computar+Active+Resources/VISWIR_01.24.2024+V1.0+.pdf (дата обращения: 15.04.2025).

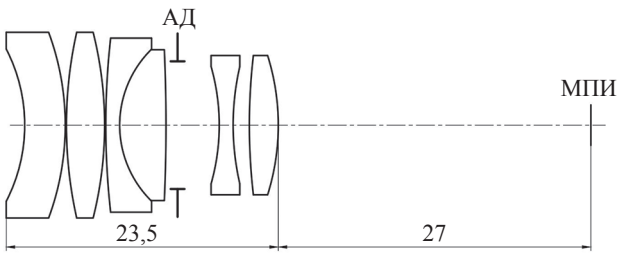


Рис. 1. Архитектура оптической схемы рассчитанного объектива.

АД — апертурная диафрагма; МПИ — фоточувствительная плоскость матричного приемника излучения

Fig. 1. The optical scheme architecture of the designed objective.

АД — aperture diaphragm; МПИ — photosensitive surface of the image sensor

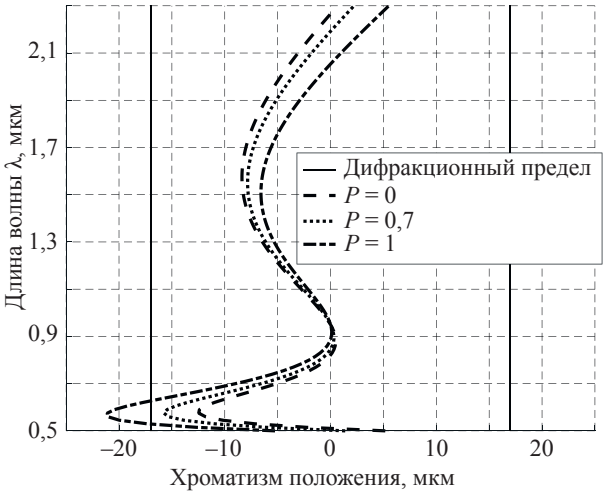


Рис. 2. Хроматизм положения для различных относительных координат зрачка *P*

Fig. 2. Chromatic focal shift for different pupil coordinates in arbitrary units

лось. Потому была проведена глобальная оптимизация в существенно более широком диапазоне длин волн от 0,5 до 2,3 мкм, который позволяет использовать предложенную оптическую систему в комбинации как с кремниевыми МПИ, так и с МПИ на основе InGaAs. Архитектура оптической схемы рассчитанного объектива представлена на рис. 1.

Анализ качества изображения оптической системы объектива

Рассчитанный объектив предлагается использовать в спектральных системах с МПИ, поэтому, кроме хроматических аберраций оптической системы, анализу также подлежат показатели качества монохроматических аберраций на отдельных длинах волн.

При анализе оптической системы рассчитанного объектива было установлено, что в результате глобальной оптимизации был устранен третичный спектр (рис. 2), улучшена коррекция хроматизма увеличения для спектрального диапазона от 0,5 до 2,3 мкм (рис. 3), полихроматическая модуляционная передаточная функция близка к дифракционной (рис. 4), а также улучшена коррекция монохроматических аберраций в указанном диапазоне длин волн (рис. 5)[1].

Таким образом, хроматические аберрации устранены с дифракционным качеством, а монохроматические аберрации устранены с близким к дифракционному качеством во всем диапазоне длин волн. Получены основные технические характеристики рассчитанного объектива: рабочий спектральный диапазон — 0,5–2,3 мкм; относительное отверстие — 1:3; фокусное расстояние — 35 мм; линейное поле изображения (размер МПИ) — 4,2 × 3,5 мм; дисторсия — 0,1 %; виньетирование — отсутствует.

[1] Все характеристики приведены относительно основной длины волны $l = 0{,}95$ мкм.

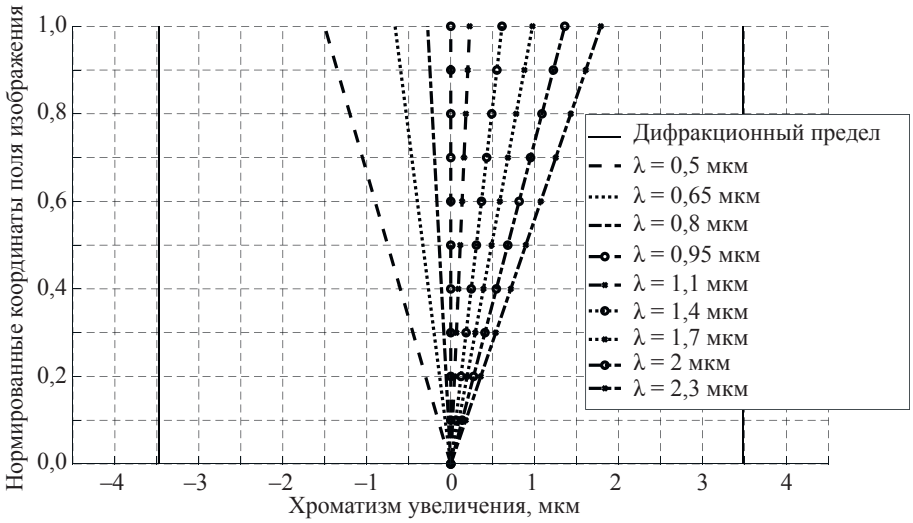


Рис. 3. Хроматизм увеличения для различных длин волн

Fig. 3. Lateral color for different wavelengths

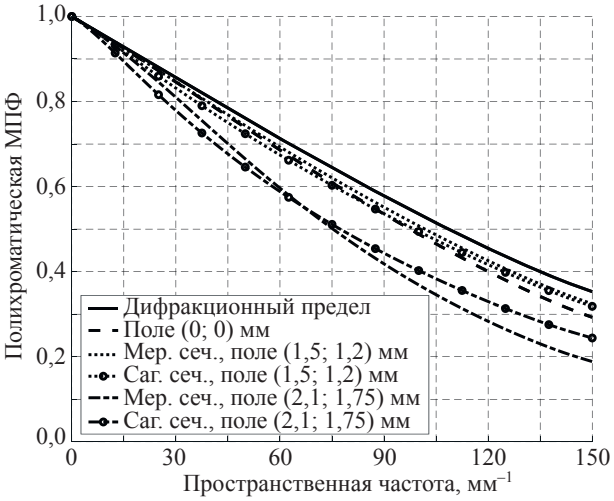


Рис. 4. Полихроматическая модуляционная передаточная функция (МПФ) в меридиональном (мер. сеч.) и сагиттальном (саг. сеч.) сечениях для различных точек поля в координатах изображения

Fig. 4. Polychromatic modulation transfer function in tangential and sagittal cross-sections for different fields in image coordinates

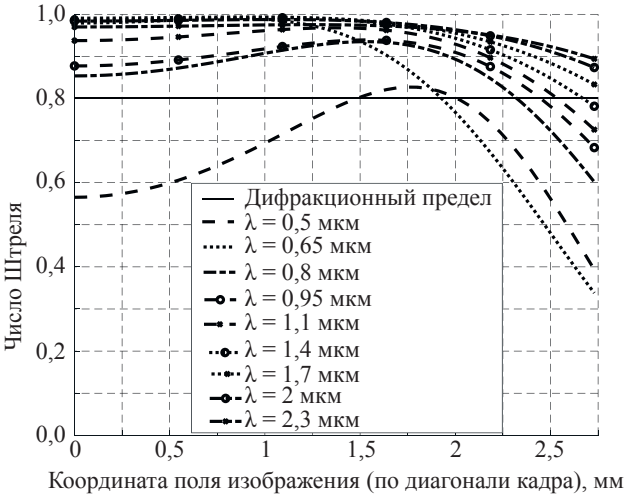


Рис. 5. Число Штреля для различных длин волн

Fig. 5. Strehl ratio for different wavelengths

Заключение

В работе спроектирован объектив, обладающий качеством изображения, близким к дифракционному, и практически лишенный хроматических аберраций в очень широком диапазоне длин волн (0,5–2,3 мкм). Объектив может найти применение в спектральных системах любого типа, имеет высокую степень технологичности и унификации, так как содержит в себе всего шесть линз (без асферических поверхностей) из двух марок стекол. Разработанный объектив достаточно просто масштабируется на другие фокусные расстояния без потери качества изображения и степени коррекции хроматических аберраций. Архитектура оптической схемы рассчитанного объектива может быть использована как базовая для расчета оптических систем с бóльшими полями зрения и относительными отверстиями.

Литература

1. Bhargava A., Sachdeva A., Sharma K., Alsharif M.H., Uthansakul P., Uthansakul M. Hyperspectral imaging and its applications: A review // Heliyon. 2024. V. 10. N 12. P. e33208. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e33208
2. Yoon J. Hyperspectral imaging for clinical applications // BioChip Journal. 2022. V. 16. N 1. P. 1–12. https://doi.org/10.1007/s13206-021-00041-0
3. Huang L., Luo R., Liu X., Hao X. Spectral imaging with deep learning // Light: Science & Applications. 2022. V. 11. N 1. P. 61. https://doi.org/10.1038/s41377-022-00743-6
4. Gu Y., Liu T., Gao G., Ren G., Ma Y., Chanussot J., Jia X. Multimodal hyperspectral remote sensing: an overview and perspective // Science China Information Sciences. 2021. V. 64. N 2. P. 121301. https://doi.org/10.1007/s11432-020-3084-1
5. Faltynkova A., Johnsen G., Wagner M. Hyperspectral imaging as an emerging tool to analyze microplastics: A systematic review and recommendations for future development // Microplastics and Nanoplastics. 2021. V. 1. N 1. P. 13. https://doi.org/10.1186/s43591-021-00014-y
6. Поляков М.П., Батшев В.И., Мачихин А.С., Пожар В.Э. Унифицированная оптическая схема акустооптического видеоспектрометра видимого диапазона спектра // Оптический журнал. 2023. Т. 90. № 11. С. 62–70. http://doi.org/10.17586/1023-5086-2023-90-11-62-70
7. Lu Q., Ding Y., Wang W., Liu S., Xu M. VIS-NIR superachromatic triplet design with five-color correction for a broadband interferometer // Applied Optics. 2022. V. 61. N 30. P. 8880–8888. https://doi.org/10.1364/AO.465959
8. Чичаева О.В., Дмитерко Р.А., Страхов А.А. Суперапохромат для широкой области спектра. Патент RU2749179C1. 2021. Бюл. № 16.

References

1. Bhargava A., Sachdeva A., Sharma K., Alsharif M.H., Uthansakul P., Uthansakul M. Hyperspectral imaging and its applications: A review. *Heliyon*, 2024, vol. 10, no. 12, pp. e33208. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e33208
2. Yoon J. Hyperspectral imaging for clinical applications. *BioChip Journal*, 2022, vol. 16, no. 1, pp. 1–12. https://doi.org/10.1007/s13206-021-00041-0
3. Huang L., Luo R., Liu X., Hao X. Spectral imaging with deep learning. *Light: Science & Applications*, 2022, vol. 11, no. 1, pp. 61. https://doi.org/10.1038/s41377-022-00743-6
4. Gu Y., Liu T., Gao G., Ren G., Ma Y., Chanussot J., Jia X. Multimodal hyperspectral remote sensing: an overview and perspective. *Science China Information Sciences*, 2021, vol. 64, no. 2, pp. 121301. https://doi.org/10.1007/s11432-020-3084-1
5. Faltynkova A., Johnsen G., Wagner M. Hyperspectral imaging as an emerging tool to analyze microplastics: A systematic review and recommendations for future development. *Microplastics and Nanoplastics*, 2021, vol. 1, no. 1, pp. 13. https://doi.org/10.1186/s43591-021-00014-y
6. Poliakov M.P., Batshev V.I., Machikhin A.S., Pozhar V.E. Unified optical scheme of an acousto-optical imaging spectrometer for the visible spectrum. *Journal of Optical Technology*, 2023, vol. 90, no. 11, pp. 674–678. https://doi.org/10.1364/JOT.90.000674
7. Lu Q., Ding Y., Wang W., Liu S., Xu M. VIS-NIR superachromatic triplet design with five-color correction for a broadband interferometer. *Applied Optics*, 2022, vol. 61, no. 30, pp. 8880–8888. https://doi.org/10.1364/AO.465959
8. Chichaeva O.V., Dmiterko R.A., Strakhov A.A. Wide spectrum superapochromat. *Patent RU2749179C1*. 2021. (in Russian)
9. Sasian J., Gao W., Yan Y. Method to design apochromat and superachromat objectives. *Optical Engineering*, 2017, vol. 56, no. 10, pp. 105106. https://doi.org/10.1117/1.OE.56.10.105106

9. Sasian J., Gao W., Yan Y. Method to design apochromat and superachromat objectives // Optical Engineering. 2017. V. 56. N 10. P. 105106. https://doi.org/10.1117/1.OE.56.10.105106
10. Yang A., Gao X., Li M. Design of apochromatic lens with large field and high definition for machine vision // Applied Optics. 2016. V. 55. N 22. P. 5977–5985. https://doi.org/10.1364/AO.55.005977
11. Архипова Л.Н., Демидова Е.А., Понин О.В., Шаров А.А. Объектив-апохромат. Патент RU2611335C1. 2017. Бюл. № 6.
12. Архипов С.А., Кушнарёв К.Г., Скляров С.Н. Апохроматические объективы для гиперспектральной аппаратуры // Контенант. 2014. Т. 15. № 1. С. 36–44.
13. Грамматин А.П., Романова Г.Э., Балаценко О.Н. Расчёт и автоматизация проектирования оптических систем. Учебное пособие. СПб: НИУ ИТМО, 2013. 128 с.
14. Заварзин В.И., Кравченко С.О., Митрофанова Ю.С. Выбор оптических материалов для минимизации хроматизма положения в перспективной широкозахватной многоспектральной аппаратуре среднего разрешения // Оптический журнал. 2016. Т. 83. № 10. С. 16–23. https://doi.org/10.1364/JOT.83.000593
15. La Serna P.S., Revuelta J.S.C. Optical glass selection for color corrected broadband instrumentation: an overview // Applied Optics. 2022. V. 61. N 3. P. A50–A61. https://doi.org/10.1364/AO.442126
16. Русинов М.М. Композиция оптических систем. М.: Либроком, 2021. 384 с.

10. Yang A., Gao X., Li M. Design of apochromatic lens with large field and high definition for machine vision. *Applied Optics*, 2016, vol. 55, no. 22, pp. 5977–5985. https://doi.org/10.1364/AO.55.005977
11. Arkhipova L.N., Demidova E.A., Ponin O.V., Sharov A.A. Apochromat lens. *Patent RU2611335C1*. 2017. (in Russian)
12. Arkhipov S.A., Kushnarev K.G., Sklyarov S.N. Apochromatic lens for hyperspectral apparatus. *Contenant*, 2014, vol. 15, no. 1, pp. 36–44. (in Russian)
13. Grammatin A.P., Romanova G.E., Balatsenko O.N. *Calculation and Automation of Optical Systems Design*. St. Petersburg, NIU ITMO, 2013, 128 p. (in Russian)
14. Zavarzin V.I., Kravchenko S.O., Mitrofanova Y.S. Selection of optical materials to minimize longitudinal chromatic aberration in a prospective broad-coverage medium-resolution multispectral instrument. *Journal of Optical Technology*, 2016, vol. 83, no. 10, pp. 593–598. https://doi.org/10.1364/jot.83.000593
15. La Serna P.S., Revuelta J.S.C. Optical glass selection for color corrected broadband instrumentation: an overview. *Applied Optics*, 2022, vol. 61, no. 3, pp. A50–A61. https://doi.org/10.1364/AO.442126
16. Rusinov M.M. *Composition of Optical Systems*. Moscow, Librokom Publ., 2021, 384 p. (in Russian)

Авторы

Поляков Михаил Петрович — младший научный сотрудник, Научно-технологический центр уникального приборостроения Российской академии наук, Москва, 117342, Российская Федерация, sc 59033553200, https://orcid.org/0009-0004-3484-6466, polyakov.mp@ntcup.ru

Хохлов Демид Денисович — кандидат технических наук, заведующий лабораторией, Научно-технологический центр уникального приборостроения Российской академии наук, Москва, 117342, Российская Федерация, sc 57188552491, https://orcid.org/0000-0003-0919-7762, khokhlov.dd@ntcup.ru

Быков Алексей Александрович — кандидат технических наук, научный сотрудник, Научно-технологический центр уникального приборостроения Российской академии наук, Москва, 117342, Российская Федерация, sc 57203226784, https://orcid.org/0000-0002-7574-3437, bykov@ntcup.ru

Authors

Mikhail P. Poliakov — Junior Researcher, Scientific and Technological Centre of Unique Instrumentation of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 117342, Russian Federation, sc 59033553200, https://orcid.org/0009-0004-3484-6466, polyakov.mp@ntcup.ru

Demid D. Khokhlov — PhD, Head of Laboratory, Scientific and Technological Centre of Unique Instrumentation of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 117342, Russian Federation, sc 57188552491, https://orcid.org/0000-0003-0919-7762, khokhlov.dd@ntcup.ru

Alexey A. Bykov — PhD, Scientific Researcher, Scientific and Technological Centre of Unique Instrumentation of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 117342, Russian Federation, sc 57203226784, https://orcid.org/0000-0002-7574-3437, bykov@ntcup.ru

Статья поступила в редакцию 22.04.2025
Одобрена после рецензирования 12.05.2025
Принята к печати 22.07.2025

Received 22.04.2025
Approved after reviewing 12.05.2025
Accepted 22.07.2025

Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ
июль–август 2025 Том 25 № 4 http://ntv.ifmo.ru/
SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL OF INFORMATION TECHNOLOGIES, MECHANICS AND OPTICS
Jule–August 2025 Vol. 25 No 4 http://ntv.ifmo.ru/en/
ISSN 2226-1494 (print) ISSN 2500-0373 (online)

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ

doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-4-591-601
УДК 681.7.068; 621.373.8; 621.375.8

Применение эффекта перекрестной модуляции усиления в эрбиевом волокне для увеличения эффективной ширины спектра интеррогатора

Владислав Николаевич Назаренко[1]✉, Виктор Андреевич Иудин[2], Сергей Александрович Волковский[3], Артем Сергеевич Алейник[4]

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

[1] vladnaz411@gmail.com✉, https://orcid.org/0009-0006-2597-9413
[2] iudin.viktor98@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-5913-1000
[3] savolkovskii@itmo.ru, https://orcid.org/0000-0001-8462-5208
[4] artemal@itmo.ru, https://orcid.org/0000-0002-7682-348X

Аннотация

Введение. Исследовано влияние эффекта перекрестной модуляции усиления в эрбиевом волокне на эффективную ширину спектрального диапазона волоконно-оптической системы опроса датчиков (интеррогатора), использующей волоконные брэгговские решетки и лазерный диод с распределенной обратной связью. Интеррогаторы на основе лазерных диодов обладают высокой скоростью (до 33 пм/нс) и большим диапазоном перестройки длины волны (до 10 нм). Однако при перестройке длины волны таких лазеров возникает нестабильность мгновенной мощности зондирующего импульса, которая может достигать 20 дБ. Такая нестабильность приводит к ошибкам при опросе датчиков на основе волоконных брэгговских решеток. Для уменьшения ошибок обычно анализируют только часть импульса интеррогатора, в течение которой мощность остается относительно стабильной (в пределах 1 дБ). Это приводит к уменьшению эффективной ширины спектрального диапазона интеррогатора (до 20 %). Для решения подобной проблемы впервые предложено использовать эффект перекрестной модуляции усиления в эрбиевом волокне. **Метод.** При оценке возможности применения эффекта перекрестной модуляции усиления для увеличения эффективной ширины спектрального диапазона интеррогатора выполнен теоретический анализ взаимодействия в эрбиевом волокне двух оптических сигналов: зондирующего сигнала интеррогатора и дополнительного управляющего сигнала. Количественная оценка влияния этого эффекта на нестабильность мгновенной мощности и эффективную ширину спектральный диапазона интеррогатора выполнена в среде Optisystem. Исследовано влияние формы управляющего сигнала и величины смещения момента начала генерации управляющего сигнала на эффективную ширину спектрального диапазона интеррогатора. Предложенный подход позволяет не только оптимизировать временной профиль оптического импульса субмикросекундной длительности, но и увеличить его амплитуду за счет усиления в эрбиевом волокне. **Основные результаты.** Показано, что перекрестная модуляция усиления позволяет управлять мгновенной мощностью зондирующего сигнала с глубиной модуляции до 30 дБ, что достаточно для стабилизации мощности импульса лазерного диода с распределенной обратной связью. Численное моделирование подтвердило, что подбор формы и смещение момента начала генерации управляющего сигнала позволяет существенно уменьшить нестабильность мгновенной мощности зондирующего импульса. Показано, что при использовании для модуляции управляющего сигнала импульсов прямоугольной формы нестабильность мощности зондирующего сигнала уменьшается с 20 до 7 дБ. Длительность стабильной модуляции на уровне от максимальной мощности 1 дБ увеличивается с 62 до 267 нс. Это позволяет увеличить эффективную ширину спектрального диапазона интеррогатора в 4,3 раза. **Обсуждение.** Эффект перекрестной модуляции усиления в эрбиевом волокне может быть использован для увеличения стабильности интеррогаторов на основе лазерных диодов без применения высокочастотных аттенюаторов. Повышается дальность их работы, снижаются требования к отражательной способности используемых волоконных брэгговских решеток.

Ключевые слова

эффект перекрестной модуляции усиления, эрбиевое волокно, насыщение усиления, волоконно-оптический интеррогатор, лазерный диод с распределенной обратной связью, волоконные брэгговские решетки

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSER-2024-0006).

© Назаренко В.Н., Иудин В.А., Волковский С.А., Алейник А.С., 2025

Ссылка для цитирования: Назаренко В.Н., Иудин В.А., Волковский С.А., Алейник А.С. Применение эффекта перекрестной модуляции усиления в эрбиевом волокне для увеличения эффективной ширины спектра интеррогатора // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2025. Т. 25, № 4. С. 591–601. doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-4-591-601

Application of the cross-gain modulation in erbium-doped fiber to increase the effective spectral bandwidth of an interrogator

Vladislav N. Nazarenko[1]✉, Viktor A. Iudin[2], Sergey A. Volkovskiy[3], Artem S. Aleynik[4]

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

[1] vladnaz411@gmail.com✉, https://orcid.org/0009-0006-2597-9413
[2] iudin.viktor98@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-5913-1000
[3] savolkovskii@itmo.ru, https://orcid.org/0000-0001-8462-5208
[4] artemal@itmo.ru, https://orcid.org/0000-0002-7682-348X

Abstract

This study investigates the impact of Cross-Gain Modulation (XGM) in erbium-doped fiber on the effective spectral bandwidth of a fiber-optic sensor interrogation system employing Fiber Bragg Gratings (FBGs) and a Distributed Feedback (DFB) laser diode. DFB-laser-based interrogators offer high scanning speeds (up to 33 pm/ns) and broad wavelength tuning ranges (up to 10 nm). However, wavelength tuning in such lasers often introduces significant fluctuations in the instantaneous power of the probing pulse — up to 20 dB, which can lead to measurement errors when interrogating FBG-based sensors. To mitigate this, only the portion of the pulse with relatively stable power (within 1 dB) is typically used for analysis. This approach, however, reduces the effective spectral bandwidth of the interrogator by up to 20 %. To solve this problem, we propose, for the first time, the use of XGM in erbium-doped fiber to enhance performance. To evaluate the potential of XGM for increasing the effective spectral bandwidth, we conducted a theoretical analysis of the interaction between two optical signals in erbium-doped fiber: the interrogator probe signal and an additional control signal. The influence of XGM on power stability and effective spectral bandwidth was assessed through numerical modeling using the OptiSystem software. We also examined how the shape of the control signal and the timing of its initiation affect the interrogator spectral bandwidth. This approach enables not only the optimization of the temporal profile of sub-microsecond optical pulses but also their amplitude enhancement through fiber amplification. The results show that XGM can effectively modulate the instantaneous power of the probe signal with a modulation depth of up to 30 dB — sufficient to stabilize the output of DFB laser pulses. Simulations confirm that appropriate shaping and timing of the control signal can significantly reduce power fluctuations. Specifically, using rectangular control pulses decreases the power variation from 20 dB to 7 dB. Furthermore, the duration of stable pulse modulation (within 1 dB of the peak power) increases from 62 ns to 267 ns, leading to a 4.3-fold expansion of the interrogator effective spectral bandwidth. The application of XGM in erbium-doped fiber offers a promising solution for improving the stability of DFB-laser-based interrogators without relying on high-frequency attenuators. This enhancement extends the operational range of the system and relaxes the reflectivity requirements for the FBGs used in the sensor network.

Keywords

modulated fiber optic amplifier, cross gain modulation, erbium fiber, gain saturation, fiber optic interrogator, distributed feedback laser diode

Acknowledgements

The research was carried out within the State Assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project No. FSER-2024-0006).

For citation: Nazarenko V.N., Iudin V.A., Volkovskiy S.A., Aleynik A.S. Application of the cross-gain modulation in erbium-doped fiber to increase the effective spectral bandwidth of an interrogator. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2025, vol. 25, no. 4, pp. 591–601 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-4-591-601

Введение

Волоконные брэгговские решетки (ВБР) широко применяются в качестве чувствительных элементов (ЧЭ) измерителей различных физических величин в волоконных системах опроса. Это обусловлено их способностью к мультиплексированию внутри одного оптического волокна, устойчивостью к электромагнитным помехам, высокой чувствительностью и компактными размерами [1]. Область применения ЧЭ на основе ВБР в различных технических сферах обширна и включает определение деформации крыльев самолетов [2], измерение температуры в медицинских приборах [3], измерение давления и температуры в нефтяных скважинах [4], а также контроль деформации в биомеханике [5]. Для увеличения числа детектируемых ЧЭ используются методы мультиплексирования с разделением по времени [6], по длине волны [7], а также гибридные системы [8].

Принцип работы ЧЭ на основе ВБР заключается в том, что воздействие различных механических, тепловых или электромагнитных эффектов приводит к смещению по длине волны спектров отражения и пропускания. Измеряя оптические спектры датчика на основе ВБР, можно определить значения таких величин, как ток, напряжение, температура, деформация, линейное перемещение, ускорение и другие физические величины. Для измерения спектра ВБР и определения его

смещения обычно применяются комбинации широкополосного источника оптического излучения и анализатора спектра. Однако оптические анализаторы спектра представляют собой крупногабаритное оборудование с низкой скоростью сканирования длины волны, что значительно затрудняет их прикладное использование в системах опроса [9]. Кроме того, традиционные системы опроса ВБР являются дорогостоящими, поэтому для повышения их доступности и расширения области применения необходима разработка новых систем опроса датчиков на основе ВБР [10].

Существуют системы опроса датчиков ВБР, основанные на измерении уровня мгновенной мощности отраженного от ВБР зондирующего оптического сигнала (интеррогаторы). Интеррогаторы, в отличие от традиционных методов измерения, не требуют применения дорогостоящего спектрометрического оборудования. Интеррогаторы преимущественно основаны на использовании узкополосных лазерных диодов [11], согласованных ВБР [12, 13], краевых [14] и гауссовых фильтров [15, 16]. Однако существующие решения имеют ряд ограничений, включая крупные габариты и существенное увеличение сложности и стоимости системы при опросе нескольких датчиков ВБР [10].

Одним из способов увеличения числа одновременно опрашиваемых датчиков ВБР является их мультиплексирование по длине волны. Такой метод требует использования узкополосного источника с возможностью перестройки длины волны оптического излучения, например, лазерного диода с распределенной обратной связью (РОС) [17].

Лазерные диоды с РОС обладают рядом существенных преимуществ. Во-первых, ширина спектральной линии излучения таких лазеров составляет всего несколько пикометров. Во-вторых, РОС-лазеры обеспечивают перестройку длины волны со скоростью до 33 пм/нс в спектральном диапазоне 10 нм [17]. Кроме того, благодаря широкому распространению в области оптических телекоммуникаций и массовому производству, они имеют относительно низкую стоимость [18].

Перестройка длины волны РОС-диода осуществляется посредством пропускания тока, значительно превышающего рабочий ток диода. Сверхбольшие токи вызывают быстрый нагрев активной среды, что приводит к изменению периода структуры РОС и, следовательно, сдвигу основной длины волны излучения лазера [17]. Однако для достижения постоянной скорости перестройки длины волны необходимо подавать на диод импульс тока инжекции сложной формы, что влечет за собой нестабильность оптической мощности зондирующего импульса. В работе [17] приведена система опроса ВБР на основе РОС-лазера, в которой, для достижения перестройки центральной длины волны со скоростью, близкой к линейной, использовался пилообразный токовый импульс. При этом отклонение мгновенной мощности зондирующего импульса интеррогатора составило 20 дБ [17].

Такая особенность системы опроса ограничивает возможность увеличения количества мультиплексируемых ЧЭ за счет уменьшения диапазона длин волн перестройки, при котором достигается необходимый уровень мощности РОС-лазера. Величина мгновенной мощности зондирующего импульса может варьироваться в пределах двух порядков, вследствие чего части импульса с экстремально низким или высоким уровнем мощности могут выходить за пределы рабочего диапазона фотодетектора. Более того, сложная форма временного профиля мгновенной мощности зондирующего импульса может приводить к ошибкам определения длины волны. Например, в [19] показано, что измеренная длина волны ВБР в системе опроса датчиков с нарастающим уровнем мгновенной мощности источника излучения может отклоняться от реального значения на 0,044–0,116 нм.

Для достижения максимальной спектральной эффективности необходимо обеспечить высокий и стабильный уровень мгновенной мощности зондирующих импульсов. Известны экспериментальные результаты исследования по увеличению и стабилизации мгновенной мощности зондирующего сигнала интеррогатора на основе вертикально излучающего лазера с помощью эрбиевого волокна. Такой метод позволяет снизить отклонение уровня мгновенной мощности с 220 % до 18 %. Однако интеррогаторы на основе вертикально излучающего лазера характеризуются относительно низкой скоростью перестройки [19].

В настоящей работе впервые предлагается метод стабилизации уровня мгновенной мощности зондирующего импульса интеррогатора на основе РОС-лазера посредством эффекта перекрестной модуляции усиления в эрбиевом волокне. Предложенный подход позволяет не только оптимизировать временной профиль оптического импульса субмикросекундной длительности, но и увеличить его амплитуду за счет усиления в эрбиевом волокне.

Эффект перекрестной модуляции в эрбиевом волокне

Эрбиевое оптическое волокно хорошо известно за счет востребованности в области оптических телекоммуникаций в качестве основного элемента для волоконно-оптических эрбиевых усилителей. Подобные усилители широко используются в оптических линиях связи благодаря таким характеристикам, как независящее от поляризации усиление, широкая спектральная полоса усиления и низкий уровень шума. Оптическое усиление в эрбиевом волокне осуществляется благодаря легирующему редкоземельному металлу — эрбию, имеющему соответствующие энергетические уровни в своей атомной структуре для усиления излучения в С-диапазоне частот оптических телекоммуникационных линий. Усиление возникает вследствие вынужденного излучения в активной среде с инверсией населенности, которая поддерживается при помощи оптической накачки. Эффективная накачка легированного эрбием волокна может быть обеспечена лазерным излучением на длинах волн 800, 980 и 1480 нм [17].

Коэффициент усиления волоконно-оптических эрбиевых усилителей снижается при превышении уровня входной оптической мощности определенного порога, называемого мощностью насыщения. Это связано со

снижением концентрации возбужденных носителей заряда в эрбиевом волокне в результате стимулированного излучения при высокой оптической мощности. Такой эффект называется насыщением усиления [20].

При взаимодействии двух и более оптических сигналов каждый из них играет роль в насыщении усиления, вследствие чего коэффициент усиления зависит от мгновенной мощности каждого сигнала. Этот эффект, называемый эффектом перекрестной модуляции коэффициента усиления в эрбиевом волокне, применяется для полностью оптического преобразования длины волны несущего сигнала в телекоммуникационных системах [21]. Метод амплитудной модуляции на основе этого эффекта является недорогим по сравнению с устройствами акустооптической и электрооптической модуляции, обеспечивая при этом более высокое быстродействие, чем механо-оптические модуляторы.

Для математического описания эффекта перекрестной модуляции применяется теория усиления множества сигналов, одновременно распространяющихся в эрбиевом волокне, представленная в работе [22]. Эта теория предлагает следующее аналитическое решение для потоков фотонов каждого из сигналов:

$$Q_k^{out} = Q_k^{in}\exp\left\{\frac{(\alpha_k + g_k^*)}{\zeta}(Q^{in} - Q^{out}) - \alpha_k L\right\}, \quad (1)$$

$$Q^{out} = \sum_k Q_k^{in}\exp\left\{\frac{(\alpha_k + g_k^*)}{\zeta}(Q^{in} - Q^{out}) - \alpha_k L\right\}, \quad (2)$$

где Q^{out} и Q^{in} — полные исходящий и входной потоки фотонов; Q_k^{out} и Q_k^{in} — исходящий и входной потоки фотонов k-го сигнала; α_k и g_k^* — коэффициенты поглощения и усиления k-го сигнала; L — длина волокна; ζ — коэффициент, характеризующий параметры эрбиевого волокна. Q^{out} выражено в формуле (2) в неявном виде и может быть найдено с помощью любого из множества численных методов нахождения корней уравнений, например метода Ньютона.

Данное аналитическое решение позволяет рассчитывать выходную мощность и коэффициенты усиления для k сигналов на основе измеряемых параметров: α_k, g_k^*, L; входных мощностей сигналов P_k^{in} и коэффициента ζ, связанного с мощностью насыщения усиления P_k^{sat} и коэффициентами поглощения и усиления $\zeta = P_k^{sat}(\alpha_k + g_k^*)/h\nu_k$, h — постоянная Планка, ν_k — оптическая частота k-го сигнала.

Аналитическое решение получено при допущении, что вклад усиленного спонтанного излучения и потери мощности в волокне пренебрежимо малы, а коэффициент перекрытия модового пятна сигнала с областью легирования эрбия общий для всех сигналов и учтен в параметре ζ [22].

Теория справедлива для взаимодействия сигналов, энергия фотонов которых соответствует переходам между уровнями $^4I_{15/2}$ и $^4I_{13/2}$ легированного эрбием волокна, и не учитывает излучение накачки на длине волны 980 нм. Такое излучение можно учесть, предположив, что в стационарном состоянии населенность уровня $^4I_{11/2}$ стремится к нулю, и, следовательно, принять коэффициент усиления g_k^* равным нулю. Физический смысл такого допущения подразумевает, что вероятность усиления сигнала накачки с длиной волны 980 нм всегда равна нулю, независимо от населенности уровня $^4I_{13/2}$. В таком случае множество N сигналов накачки на длине волны 980 нм можно включить в множество K всех сигналов.

На основе уравнений (1) и (2) были определены характеристики системы, состоящей из эрбиевого волокна длиной 5 м, сигнала накачки на длине волны 980 нм мощностью 500 мВт, несущего сигнала на длине волны 1550 нм и управляющего сигнала на длине волны 1560 нм. Несущий сигнал — полезный сигнал, содержащий какую-либо информацию, в рассматриваемом случае является зондирующим сигналом интеррогатора, а управляющий сигнал изменяет коэффициент усиления в эрбиевом волокне, приводя к модуляции мгновенной мощности несущего сигнала.

На рис. 1 представлены результаты расчета усиления и мощности усиленного несущего сигнала в зависимости от мощностей несущего и управляющего сигналов. По рис. 1, *a* видно, что усиление несущего сигнала зависит от суммы мощностей несущего и управляющего сигналов.

При мощностях несущего и управляющего сигналов, не превышающих уровень 30 дБм, усиление составляет около 35 дБ и не зависит от изменения уровня мощности, так как мощности сигналов недостаточно, чтобы существенно повлиять на инверсию населенности в волокне. Пока ни несущий, ни управляющий сигналы не превышают уровень мощности 20 дБм, и один из них составляет не менее –30 дБм, в волокне наблюдается эффект насыщения усиления, вследствие которого коэффициент усиления сильно зависит от мощности сигналов. При превышении несущим или управляющим сигналами уровня мощности в 20 дБм, волокно просветляется на длине волны 1550 нм и сигнал перестает усиливаться. На рис. 1, *b* представлена зависимость мощности усиленного несущего сигнала от мощности несущего и управляющего сигналов. Особый интерес представляет область, в которой уровень мощности несущего сигнала варьируется от –50 до 0 дБм, а управляющего от –20 до 20 дБм. В данном диапазоне проявляется эффект перекрестной модуляции усиления, вследствие которого усиление несущего сигнала существенно зависит от уровня мощности управляющего сигнала. Отметим, что в этой области кривые равной мощности (линии одного цвета, рис. 1, *b*) характеризуются наибольшей кривизной. Вследствие этого для широкого диапазона мощности несущего сигнала возможно подобрать такую мощность управляющего сигнала, при которой мощность усиленного несущего сигнала остается постоянной. Например, для входного сигнала в диапазоне от –30 до 0 дБм при соответствующем выборе мощности управляющего сигнала от –20 до 20 дБм выходная мощность несущего сигнала стабильно составляет 5 дБм (утолщенная кривая, рис. 1, *b*).

Согласно теоретическим расчетам, глубина модуляции может достигать значения 30 дБ. Такая величина представляется достаточной для компенсации нестабильности мгновенной мощности зондирующего сиг-

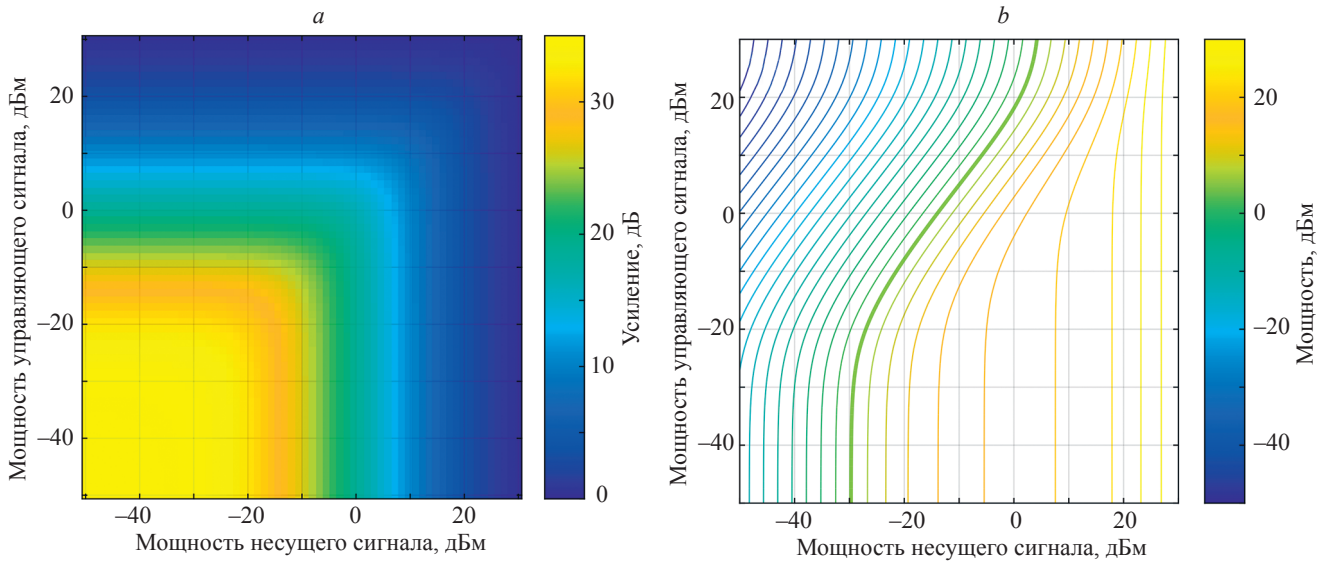


Рис. 1. Результаты расчета усиления (*a*) и мощности (*b*) усиленного несущего сигнала в зависимости от мощности несущего и управляющего сигналов

Fig. 1. Simulation results of the gain (*a*) and power (*b*) of the amplified carrier signal as functions of the carrier and control signal powers

нала интеррогатора на основе стандартного лазерного диода с РОС.

Необходимо учесть, что ряд допущений, принятых в работе [22] при выведении уравнений (1) и (2), и в настоящей работе, при учете излучения накачки на длине волны 980 нм в теорию, может существенно повлиять на соответствие математической модели действительности.

Моделирование метода стабилизации уровня мгновенной мощности зондирующего импульса интеррогатора на основе РОСлазера в Optisystem

На основе результатов теоретического анализа эффекта перекрестной модуляции усиления в эрбиевом волокне предлагается метод стабилизации уровня мгновенной мощности зондирующего импульса интеррогатора на основе РОСлазера. Представленный метод заключается в следующем. Зондирующий импульс с длиной волны в пределах 1520–1560 нм вводится в отрезок эрбиевого волокна, в котором предварительно создана высокая инверсия населенности посредством накачки на длине волны 980 нм. Практически одновременно с противоположного конца этого же отрезка эрбиевого волокна через оптический циркулятор вводится дополнительный управляющий импульс с длиной волны того же спектрального диапазона 1520–1560 нм для модуляции коэффициента усиления.

Настройка системы для достижения оптимальной стабильности уровня мгновенной мощности зондирующего импульса интеррогатора достигается тщательным подбором нескольких ключевых параметров: временного профиля управляющего импульса, импульсной мощности как зондирующего, так и управляющего импульсов, мощности лазерного диода накачки (ЛДН), длины и коэффициента поглощения эрбиевого волокна, а также смещением момента начала зондирующего импульса интеррогатора относительно момента начала управляющего импульса.

Необходимо учитывать существенное ограничение данного метода, связанное с конечным временем жизни уровня $^4I_{11/2}$, которое составляет приблизительно 10^{-6} с. Вследствие этого, время восстановления инверсии населенности за счет излучения накачки не может быть меньше указанного значения, что создает жесткое ограничение верхней частоты следования импульсов на уровне 100 кГц. Данное ограничение потенциально можно преодолеть, используя накачку на длине волны 1480 нм или применяя методы, позволяющие сократить время жизни уровня $^4I_{11/2}$. Отметим, что частота 100 кГц превышает стандартную частоту опроса интеррогаторов на основе РОСлазеров, что делает предложенный метод вполне применимым для большинства практических задач.

Для более детального изучения эффекта перекрестной модуляции усиления и метода стабилизации уровня мгновенной мощности зондирующего импульса интеррогатора на основе РОС-лазера далее представлен анализ на основе численных методов, позволяющих проводить время-разрешенное моделирование характеристик оптического волокна.

Численное моделирование проведено при помощи программной среды OptiSystem производства компании OptiWave Systems Inc (Канада). Эта среда позволяет проводить моделирование оптических систем с активными оптическими волокнами, учитывая время жизни активных носителей заряда в метастабильном состоянии, пространственное распределение инверсии населенности носителей по длине эрбиевого волокна и усиленное спонтанное излучение.

В рассматриваемой системе используется отрезок активного эрбиевого волокна (АЭВ) марки Fibercore I-12 длиной 7 м, с поглощением 7,4 дБ/м на длине волны зондирующего сигнала интеррогатора

1550 нм и поглощением 13 дБ/м на длине волны накачки 980 нм.

Схема системы для стабилизации уровня мгновенной мощности зондирующего импульса интеррогатора на основе предлагаемого метода продемонстрирована на рис. 2. Накачка АЭВ осуществляется при помощи ЛДН через мультиплексор селективный по длине волны (МСДВ). В АЭВ подаются зондирующий сигнал интеррогатора ЛД1 с длиной волны 1550 нм, через оптический изолятор ИЗО1, и управляющий сигнал ЛД2 с длиной волны 1560 нм через оптический циркулятор (ЦИР), что обеспечивает пространственное разделение оптических путей зондирующего и управляющего сигналов. Усиленный зондирующий сигнал интеррогатора с выхода циркулятора через изолятор ИЗО2 направляется на фотоприемник (ФП) для анализа временного профиля усиленного зондирующего сигнала.

В среде Optisystem построена оптическая модель, соответствующая оптической схеме, изображенной на рис. 2. Характеристики источников излучения приведены в табл. 1. ЛД1 излучает зондирующий сигнал интеррогатора пилообразного профиля длительностью 300 нс с постоянным нарастанием уровня мгновенной мощности. Уровень мгновенной мощности зондирующего сигнала изменяется от –40 дБм до –20 дБм. ЛД2 излучает управляющий сигнал различных профилей в форме гауссовой функции пилообразной и прямоугольной форм, длительностью 300 нс. Уровень мгновенной мощности и зондирующего сигнала изменяется от –40 дБм до 21 дБм. ЛДН генерирует постоянное излучение накачки мощностью 23 дБм.

Исследование характеристик моделируемой системы проводилось при различных формах временного профиля мощности управляющего оптического сигнала.

Прямоугольный временной профиль импульса выбран, исходя из простоты генерации при помощи стандартных драйверов лазерных диодов, что делает ее наиболее удобной для практической реализации. Кроме того, прямоугольный временной профиль управляющего сигнала обеспечивает резкие переходы между уровнями мощности, что позволяет наиболее эффективно управлять насыщением усиления в эрбиевом волокне.

Гауссов временной профиль управляющего импульса, исследованный в настоящей работе, приближен к

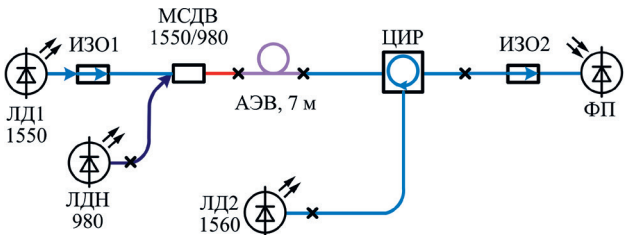


Рис. 2. Оптическая схема системы стабилизации уровня мгновенной мощности зондирующего импульса интеррогатора на основе лазера с распределенной обратной связью посредством эффекта перекрестной модуляции усиления в эрбиевом волокне

Fig. 2. Optical scheme of the system for stabilizing the instantaneous power of the interrogator probe pulse based on a distributed feedback laser using the cross-gain modulation effect in erbium-doped fiber

форме импульсов, возникающих в реальных системах из-за инерционности активной среды и ограниченной полосы пропускания используемых компонентов. Вместе с тем такая форма управляющего импульса позволяет исследовать влияние плавных изменений мощности на эффективность эффекта перекрестной модуляции усиления.

Пилообразная форма импульса имитирует типичный временной профиль мощности зондирующего сигнала интеррогатора на основе лазерного диода с РОС. Использование пилообразной формы временного профиля управляющего импульса может благоприятно повлиять на простоту практической реализации, так как использование источника управляющего сигнала, аналогичного источнику зондирующего сигнала, может упростить как разработку электронной схемы, так и алгоритма управления драйверами лазерных диодов.

Для каждого управляющего сигнала различной формы варьировалось смещение момента начала генерации управляющего сигнала относительно момента начала генерации зондирующего сигнала. Для оценки характеристик усиленного зондирующего сигнала использовались следующие параметры: максимальное отклонение уровня мгновенной мощности сигнала от начального значения и длительность импульса, в течение которого отклонение мгновенной мощности сигнала от максимального значения не превышает 1 дБ.

Таблица 1. Характеристики лазерных диодов в исследуемой системе

Table 1. Characteristics of the laser diodes in the studied system

Оптический сигнал	Лазерный источник	Максимальная мгновенная мощность, дБм	Ширина спектральной линии по полувысоте, нм	Длина волны, нм	Режим работы	Длительность импульса, нс
Зондирующий сигнал интеррогатора	Лазерный диод с РОС (ЛД1)	–20	0,1	1550	Импульсный	300
Управляющий сигнал	Лазерный диод с РОС (ЛД2)	21	0,1	1560	Импульсный	300
Накачка	Лазерный диод с РОС (ЛДН)	23	0,1	980	Непрерывный	—

Временные профили мощности усиленного зондирующего и управляющего сигналов для различной формы управляющего сигнала представлены на рис. 3–5.

В табл. 2 приведено соответствие смещения момента начала генерации управляющего сигнала относительно момента начала генерации зондирующего

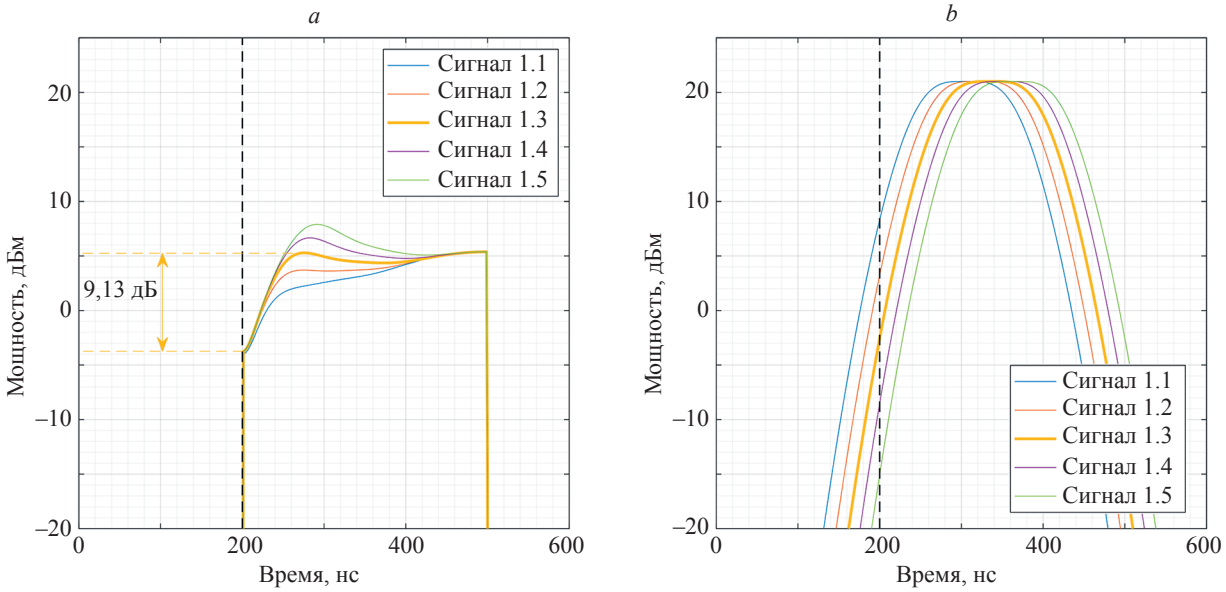


Рис. 3. Временной профиль мощности усиленного зондирующего (*a*) и управляющего (*b*) сигналов в форме гауссовой функции

Fig. 3. Power time profile of the amplified probe (*a*) and control (*b*) signal in the form of Gaussian distribution

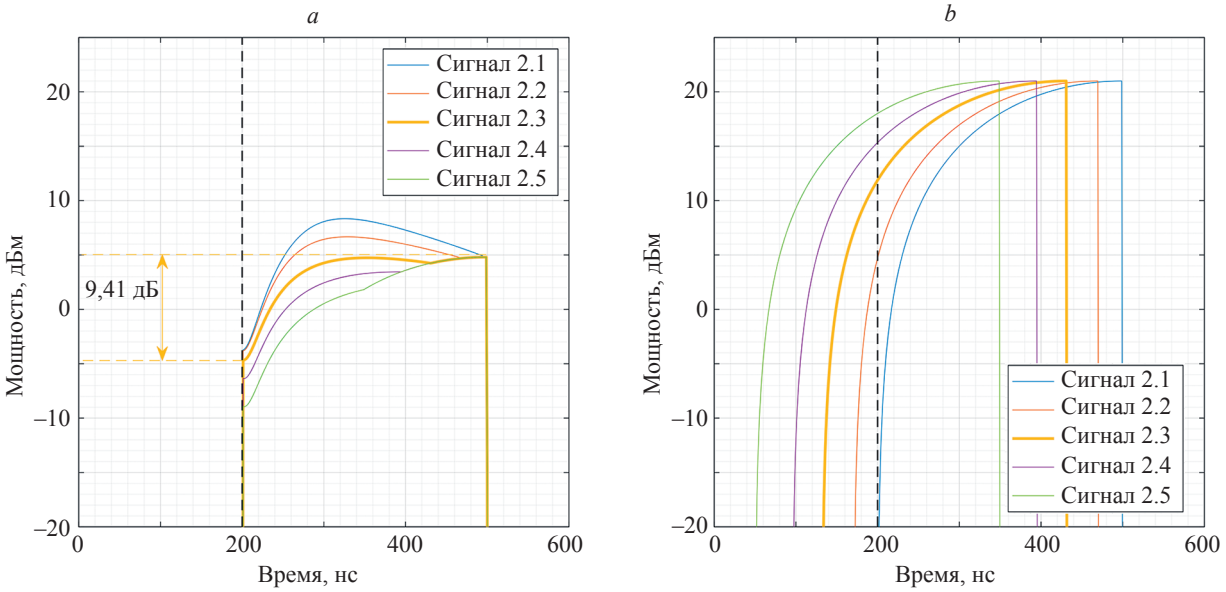


Рис. 4. Временной профиль мощности усиленного зондирующего (*a*) и управляющего (*b*) сигналов пилообразной формы

Fig. 4. Power time profile of the amplified probe signal (*a*) and sawtooth-shaped control signal (*b*)

Таблица 2. Смещение момента начала генерации управляющего сигнала для модели с профилем управляющего сигнала в форме гауссовой функции

Table 2. Time delays of control signal generation for the model with a control signal profile in the form of a Gaussian distribution

Характеристика	Номер сигнала				
	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5
Смещение момента начала генерации управляющего сигнала относительно момента начала генерации зондирующего сигнала интеррогатора, нс	–70	–55	–40	–25	–10

сигнала для модели с профилем управляющего сигнала в форме гауссовой функции. Отрицательные значения смещения момента начала генерации в табл. 2 означают запаздывание момента начала генерации зондирующего сигнала относительно момента начала генерации управляющего сигнала.

Согласно рис. 3, наименьшее максимальное отклонение мгновенной мощности усиленного зондирующего сигнала от начального значения составляет 9,13 дБ и достигается при генерации управляющего сигнала на 40 нс ранее генерации сигнала интеррогатора. При запаздывании момента начала генерации зондирующего сигнала более чем на 40 нс уменьшается длительность усиленного зондирующего импульса, в течение которой мгновенная мощность сигнала отклоняется от максимального значения не более чем на 1 дБ.

В табл. 3 приведено соответствие смещения момента начала генерации управляющего сигнала относительно момента начала генерации зондирующего сигнала для модели с пилообразной формой управляющего сигнала.

Согласно рис. 4, наименьшее максимальное отклонение мгновенной мощности усиленного зондирующего сигнала от начального значения составляет 9,41 дБ и достигается при генерации управляющего сигнала на 65 нс ранее генерации зондирующего сигнала. Максимальная длительность усиленного зондирующего импульса, в течение которой мгновенная мощность сигнала отклоняется от максимального значения не более чем на 1 дБ, также достигается при соответствующем временном смещении момента начала генерации.

В табл. 4 приведено соответствие смещения момента начала генерации управляющего сигнала относительно момента начала генерации зондирующего сигнала для модели с прямоугольной формой управляющего сигнала.

Таблица 3. Смещение момента начала генерации управляющего сигнала для модели с пилообразной формой управляющего сигнала

Table 3. Time delays of control signal generation for the model with a sawtooth form of the control signal

Характеристика	Номер сигнала				
	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5
Смещение момента начала генерации управляющего сигнала относительно момента начала генерации зондирующего сигнала интеррогатора, нс	0	–30	–65	–100	–135

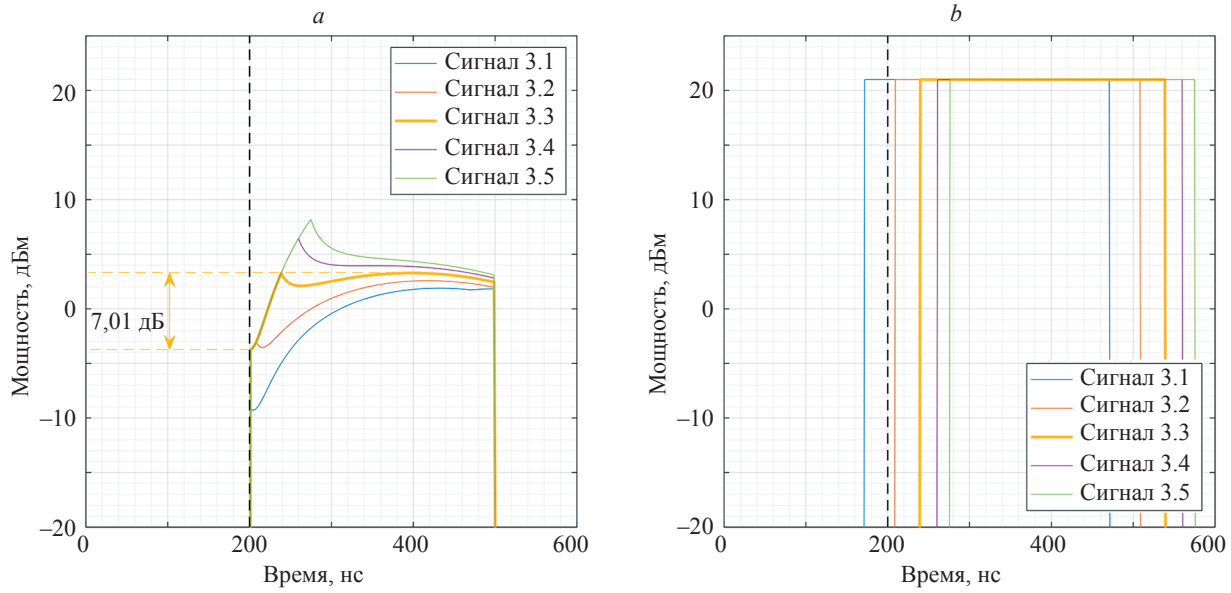


Рис. 5. Временной профиль мощности усиленного зондирующего (*a*) и управляющего (*b*) сигнала прямоугольной формы

Fig. 5. Power time profile of the amplified probe signal (*a*) and rectangular control signal (*b*)

Таблица 4. Смещение момента начала генерации управляющего сигнала для модели с прямоугольной формой управляющего сигнала

Table 4. Time delays of control signal generation for the model with a rectangular form of control signal

Характеристика	Номер сигнала				
	3.1	3.2	3.3	3.4	3.5
Смещение момента начала генерации управляющего сигнала относительно момента начала генерации зондирующего сигнала интеррогатора, нс	–25	+5	+35	+53	+70

Таблица 5. Характеристики усиленных зондирующих сигналов интеррогатора при различных формах временного профиля мощности управляющего сигнала

Table 5. Characteristics of amplified probe signals of the interrogator with different power time profiles of the control signal

Характеристика	Форма временного профиля мгновенной мощности управляющего сигнала			
	Функция Гаусса	Пилообразная	Прямоугольная	Без модуляции
Смещение момента начала генерации управляющего сигнала относительно генерации зондирующего сигнала интеррогатора, нс	–40	–65	+35	—
Наименьшее максимальное отклонение мощности усиленного зондирующего сигнала от начального значения, дБ	9,13	9,41	7,01	20,00
Длительность усиленного зондирующего сигнала при максимальном отклонении мгновенной мощности от максимального значения не более 1 дБ, нс	247	216	267	62
Эффективный спектральный диапазон, нм	2,47	2,16	2,67	0,62
Максимальная мгновенная мощность усиленного зондирующего сигнала, дБм	+5,42	+4,81	+3,56	–20,0

Согласно рис. 5, наименьшее максимальное отклонение мгновенной мощности усиленного зондирующего сигнала от начального значения составляет 7,01 дБ и достигается при генерации управляющего сигнала через 36 нс после генерации зондирующего сигнала. Максимальная длительность усиленного зондирующего импульса, в течение которой мгновенная мощность сигнала отклоняется от максимального значения не более чем на 1 дБ, также достигается при соответствующем временном смещении.

Предполагая, что для сканирования ВБР без ошибок требуется, чтобы мгновенная мощность зондирующего сигнала интеррогатора отклонялась от максимального значения не более чем на 1 дБ, и имея ввиду, что скорость перестройки длины волны лазерного диода с РОС равна 10 пм/нс, можно рассчитать эффективную ширину спектрального диапазона интеррогатора. Результаты моделирования для управляющих сигналов различной формы представлены в табл. 5.

Согласно табл. 5, оптимальными параметрами модели, при которых было получено наименьшее значение максимального отклонения уровня мгновенной мощности усиленного зондирующего сигнала и наибольшее значение длительности усиленного зондирующего сигнала при максимальном отклонении мощности не более 1 дБ, являются прямоугольная форма временного профиля мощности управляющего сигнала и смещение момента начала генерации управляющего сигнала относительно зондирующего на 36 нс. При этом, по отношению к случаю без модуляции, максимальный уровень мгновенной мощности зондирующего сигнала увеличился на 23,5 дБ, а эффективная ширина спектра увеличится в 4,3 раза и составил 2,67 нм. Можно сравнить измеренный диапазон перестройки с характерным диапазоном, требуемым для опроса датчика на основе ВБР. Например, в работе [19] сообщалось, что диапазон перестройки длины волны источника излучения 2,5 нм достаточен для измерения с помощью ВБР температуры в диапазоне 190 °C.

Заключение

В работе исследовано влияние эффекта перекрестной модуляции усиления в эрбиевом волокне на стабильность уровня мощности зондирующего сигнала интеррогатора и впервые предложено его применение для увеличения эффективного спектрального диапазона интеррогатора на основе РОС-лазера.

Теоретический анализ подтвердил, что эффект перекрестной модуляции усиления в эрбиевом волокне может оказывать достаточное воздействие для увеличения стабильности мгновенной мощности зондирующего сигнала интеррогатора на основе РОСлазера. Теоретическая глубина модуляции уровня мгновенной мощности зондирующего сигнала интеррогатора составила 30 дБ, что превышает необходимые 20 дБ.

С помощью численного моделирования в среде Optisystem проанализировано влияние формы временного профиля мгновенной мощности управляющего сигнала (распределение Гаусса, пилообразная и прямоугольная формы) и временных задержек между моментом генерации зондирующего сигнала интеррогатора и управляющего сигнала на эффективный спектральный диапазон интеррогатора с РОСлазером. Определено, что для пилообразного сигнала длительностью 300 нс, характерного для интеррогатора на основе РОСлазера, оптимальным оказалась прямоугольная форма временного профиля мгновенной мощности управляющего сигнала со смещением момента начала генерации на 36 нс относительно момента начала генерации зондирующего сигнала. Максимальное отклонение мгновенной мощности зондирующего сигнала интеррогатора от начального значения сократилось с 20 до 7 дБ, а длительность зондирующего импульса, на протяжении которой отклонение уровня мгновенной мощности от максимального значения оставалось в пределах 1 дБ, выросла с 62 до 267 нс. Таким образом, эффективный спектральный диапазон интеррогатора, по отношению к случаю без модуляции, увеличился в 4,3 раза и соста-

вил 2,6 нм по сравнению с 600 пм без усиления. Кроме того, максимальный уровень мгновенной мощности увеличился на 23,5 дБ.

Результаты теоретического исследования дают достаточные основания для разработки метода амплитудной модуляции мощности, основанного на эффекте перекрестной модуляции усиления в эрбиевом волокне, для расширения эффективного спектрального диапазона интеррогатора на основе лазерного диода с распределенной обратной связью. Полученные результаты позволяют подобрать необходимую компонентную базу для проведения экспериментального исследования и дальнейшего развития предложенного метода.

Литература

1. Soto V.D., López-Amo M. Truly remote fiber optic sensor networks // Journal of Physics: Photonics. 2019. V. 1. N 4. P. 042002. https://doi.org/10.1088/2515-7647/ab3f0e
2. Ma Z., Chen X. Fiber Bragg gratings sensors for aircraft wing shape measurement: Recent applications and technical analysis // Sensors. 2018. V. 19. N 1. P. 55. https://doi.org/10.3390/s19010055
3. Schena E.,Tosi D., Saccomandi P., Lewis E., Kim T. Fiber optic sensors for temperature monitoring during thermal treatments: an overview // Sensors. 2016. V. 16. N 7. P. 1144. https://doi.org/10.3390/s16071144
4. Qiao X., Shao Z.H., Bao W.J., Rong Q.Z. Fiber bragg grating sensors for the oil industry // Sensors. 2017. V. 17. N 3. P. 429. https://doi.org/10.3390/s17030429
5. Al-Fakih E., Osman N.A.A., Adikan F.R.M. The use of fiber Bragg grating sensors in biomechanics and rehabilitation applications: The state-of-the-art and ongoing research topics // Sensors. 2012. V. 12. N 10. P. 12890–12926. https://doi.org/10.3390/s121012890
6. Xia L., Cheng R., Li W., Liu D.M. Identical FBG-based quasi-distributed sensing by monitoring the microwave responses // IEEE Photonics Technology Letters. 2015. V. 27. N 3. P. 323–325. https://doi.org/10.1109/lpt.2014.2370650
7. Margulis W., Lindberg R., Laurell F., Hedin G. Intracavity interrogation of an array of fiber Bragg gratings // Optics Express. 2021. V. 29. N 1. P. 111–118. https://doi.org/10.1364/OE.414094
8. Luo Z., Wen H., Guo H., Yang M. A time-and wavelength-division multiplexing sensor network with ultra-weak fiber Bragg gratings // Optics Express. 2013. V. 21. N 19. P. 22799–22807. https://doi.org/10.1364/OE.21.022799
9. Chen J., Liu B., Zhang H. Review of fiber Bragg grating sensor technology // Frontiers of Optoelectronics in China. 2011. V. 4. N 2. P. 204–212. https://doi.org/10.1007/s12200-011-0130-4
10. Darwich D., Youssef A., Zaraket H. Low-cost multiple FBG interrogation technique for static applications // Optics Letters. 2020. V. 45. N 5. P. 1116–1119. https://doi.org/10.1364/OL.386053
11. Wilson A., James S.W., Tatam R.P. Time-division-multiplexed interrogation of fibre Bragg grating sensors using laser diodes // Measurement Science and Technology. 2001. V. 12. N 2. P. 181. https://doi.org/10.1088/0957-0233/12/2/309
12. Cui J., Hu Y., Feng K., Li J., Tan J. FBG interrogation method with high resolution and response speed based on a reflective-matched FBG scheme // Sensors. 2015. V. 15. N 7. P. 16516–16535. https://doi.org/10.3390/s150716516
13. Yan H.T., Liu Q., Ming Y., Luo W., Chen Y., Lu Y.Q. Metallic grating on a D-shaped fiber for refractive index sensing // IEEE Photonics Journal. 2013. V. 5. N 5. P. 4800706. https://doi.org/10.1109/JPHOT.2013.2284244
14. Kouroussis G., Kinet D., Mendoza E., Dupuy J., Moeyaert V., Caucheteur C. Edge-filter technique and dominant frequency analysis for high-speed railway monitoring with fiber Bragg gratings // Smart Materials and Structures. 2016. V. 25. N 7. P. 075029. https://doi.org/10.1088/0964-1726/25/7/075029
15. Cheng R., Xia L., Zhou J., Liu D. Wavelength interrogation of fiber Bragg grating sensors based on crossed optical Gaussian filters // Optics Letters. 2015. V. 40. N 8. P. 1760–1763. https://doi.org/10.1364/OL.40.001760
16. Fernandez M.P., Bulus-Rossini L.A., Cruz J.L., Andres M.V., Costanzo-Caso P.A. High-speed and high-resolution interrogation of FBG sensors using wavelength-to-time mapping and Gaussian filters // Optics Express. 2019. V. 27. N 25. P. 36815–36823. https://doi.org/10.1364/OE.27.036815
17. Njegovec M., Donlagic D. Interrogation of FBGs and FBGs arrays using standard telecom DFB diode // Journal of Lightwave

References

1. Soto V.D., López-Amo M. Truly remote fiber optic sensor networks. *Journal of Physics: Photonics*, 2019, vol. 1, no. 4, pp. 042002. https://doi.org/10.1088/2515-7647/ab3f0e
2. Ma Z., Chen X. Fiber Bragg gratings sensors for aircraft wing shape measurement: Recent applications and technical analysis. *Sensors*, 2018, vol. 19, no. 1, pp. 55. https://doi.org/10.3390/s19010055
3. Schena E.,Tosi D., Saccomandi P., Lewis E., Kim T. Fiber optic sensors for temperature monitoring during thermal treatments: an overview. *Sensors*, 2016, vol. 16, no. 7, pp. 1144. https://doi.org/10.3390/s16071144
4. Qiao X., Shao Z.H., Bao W.J., Rong Q.Z. Fiber bragg grating sensors for the oil industry. *Sensors*, 2017, vol. 17, no. 3, pp. 429. https://doi.org/10.3390/s17030429
5. Al-Fakih E., Osman N.A.A., Adikan F.R.M. The use of fiber Bragg grating sensors in biomechanics and rehabilitation applications: The state-of-the-art and ongoing research topics. *Sensors*, 2012, vol. 12, no. 10, pp. 12890–12926. https://doi.org/10.3390/s121012890
6. Xia L., Cheng R., Li W., Liu D.M. Identical FBG-based quasi-distributed sensing by monitoring the microwave responses. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, vol. 27, no. 3, pp. 323–325. https://doi.org/10.1109/lpt.2014.2370650
7. Margulis W., Lindberg R., Laurell F., Hedin G. Intracavity interrogation of an array of fiber Bragg gratings. *Optics Express*, 2021, vol. 29, no. 1, pp. 111–118. https://doi.org/10.1364/OE.414094
8. Luo Z., Wen H., Guo H., Yang M. A time-and wavelength-division multiplexing sensor network with ultra-weak fiber Bragg gratings. *Optics Express*, 2013, vol. 21, no. 19. pp. 22799–22807. https://doi.org/10.1364/OE.21.022799
9. Chen J., Liu B., Zhang H. Review of fiber Bragg grating sensor technology. *Frontiers of Optoelectronics in China*, 2011, vol. 4, no. 2, pp. 204–212. https://doi.org/10.1007/s12200-011-0130-4
10. Darwich D., Youssef A., Zaraket H. Low-cost multiple FBG interrogation technique for static applications. *Optics Letters*, 2020, vol. 45, no. 5, pp. 1116–1119. https://doi.org/10.1364/OL.386053
11. Wilson A., James S.W., Tatam R.P. Time-division-multiplexed interrogation of fibre Bragg grating sensors using laser diodes. *Measurement Science and Technology*, 2001, vol. 12, no. 2, pp. 181. https://doi.org/10.1088/0957-0233/12/2/309
12. Cui J., Hu Y., Feng K., Li J., Tan J. FBG interrogation method with high resolution and response speed based on a reflective-matched FBG scheme. *Sensors*, 2015, vol. 15, no. 7, pp. 16516–16535. https://doi.org/10.3390/s150716516
13. Yan H.T., Liu Q., Ming Y., Luo W., Chen Y., Lu Y.Q. Metallic grating on a D-shaped fiber for refractive index sensing. *IEEE Photonics Journal*, 2013, vol. 5, no. 5, pp. 4800706. https://doi.org/10.1109/JPHOT.2013.2284244
14. Kouroussis G., Kinet D., Mendoza E., Dupuy J., Moeyaert V., Caucheteur C. Edge-filter technique and dominant frequency analysis for high-speed railway monitoring with fiber Bragg gratings. *Smart Materials and Structures*, 2016, vol. 25, no. 7, pp. 075029. https://doi.org/10.1088/0964-1726/25/7/075029
15. Cheng R., Xia L., Zhou J., Liu D. Wavelength interrogation of fiber Bragg grating sensors based on crossed optical Gaussian filters. *Optics Letters*, 2015, vol. 40, no. 8, pp. 1760–1763. https://doi.org/10.1364/OL.40.001760
16. Fernandez M.P., Bulus-Rossini L.A., Cruz J.L., Andres M.V., Costanzo-Caso P.A. High-speed and high-resolution interrogation of FBG sensors using wavelength-to-time mapping and Gaussian filters. *Optics Express*, 2019, vol. 27, no. 25, pp. 36815–36823. https://doi.org/10.1364/OE.27.036815
17. Njegovec M., Donlagic D. Interrogation of FBGs and FBGs arrays using standard telecom DFB diode. *Journal of Lightwave Technology*,

Technology. 2016. V. 34. N 22. P. 5340–5348. https://doi.org/10.1109/JLT.2016.2616725
18. Javernik A., Donlagic D. High-speed interrogation of low-finesse Fabry–Perot sensors using a telecom DFB laser diode // Journal of Lightwave Technology. 2017. V. 35. N 11. P. 2280–2290. https://doi.org/10.1109/JLT.2016.2642222
19. Mizunami T., Hirose S., Yoshinaga T., Yamamoto K. Power-stabilized tunable narrow-band source using a VCSEL and an EDFA for FBG sensor interrogation // Measurement Science and Technology. 2013. V. 24. N 9. P. 094017. https://doi.org/10.1088/0957-0233/24/9/094017
20. Tang Y., Siahmakoun A., Granieri S.C., Vlahovic B., Cheng C. Erbium doped fiber ring laser for optical wavelength conversion // Optik. 2011. V. 122. N 4. P. 340–344. https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2010.01.007
21. Ahosan-ul-Karim M., Hossain M.I., Mehal M.T., Majumder S.P. All optical wavelength conversion based on cross gain modulation in Erbium Doped Fiber Amplifier // Proc. of the Asia-Pacific Microwave Conference. 2007. P. 1–4. https://doi.org/10.1109/APMC.2007.4554657
22. Giles C.R., Desurvire E. Modeling erbium-doped fiber amplifiers // Journal of Lightwave Technology. 1991. V. 9. N 2. P. 271–283. https://doi.org/10.1109/50.65886

2016, vol. 34, no. 22, pp. 5340–5348. https://doi.org/10.1109/JLT.2016.2616725
18. Javernik A., Donlagic D. High-speed interrogation of low-finesse Fabry–Perot sensors using a telecom DFB laser diode. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, vol. 35, no. 11, pp. 2280–2290. https://doi.org/10.1109/JLT.2016.2642222
19. Mizunami T., Hirose S., Yoshinaga T., Yamamoto K. Power-stabilized tunable narrow-band source using a VCSEL and an EDFA for FBG sensor interrogation. *Measurement Science and Technology*, 2013, vol. 24, no. 9, pp. 094017. https://doi.org/10.1088/0957-0233/24/9/094017
20. Tang Y., Siahmakoun A., Granieri S.C., Vlahovic B., Cheng C. Erbium doped fiber ring laser for optical wavelength conversion. *Optik*, 2011, vol. 122, no. 4, pp. 340–344. https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2010.01.007
21. Ahosan-ul-Karim M., Hossain M.I., Mehal M.T., Majumder S.P. All optical wavelength conversion based on cross gain modulation in Erbium Doped Fiber Amplifier. *Proc. of the Asia-Pacific Microwave Conference*, 2007, pp. 1–4. https://doi.org/10.1109/APMC.2007.4554657
22. Giles C.R., Desurvire E. Modeling erbium-doped fiber amplifiers. *Journal of Lightwave Technology*, 1991, vol. 9, no. 2, pp. 271–283. https://doi.org/10.1109/50.65886

Авторы

Назаренко Владислав Николаевич — инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, https://orcid.org/0009-0006-2597-9413, vladnaz411@gmail.com
Иудин Виктор Андреевич — инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, SC 57221049038, https://orcid.org/0000-0002-5913-1000, iudin.viktor98@gmail.com
Волковский Сергей Александрович — кандидат технических наук, научный сотрудник, ассистент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, SC 57195476252, https://orcid.org/0000-0001-8462-5208, savolkovskii@itmo.ru
Алейник Артем Сергеевич — кандидат технических наук, доцент, заведующий лабораторией, технический директор, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, SC 54793978900, https://orcid.org/0000-0002-7682-348X, artemal@itmo.ru

Authors

Vladislav N. Nazarenko — Engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, https://orcid.org/0009-0006-2597-9413, vladnaz411@gmail.com
Viktor A. Iudin — Engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, SC 57221049038, https://orcid.org/0000-0002-5913-1000, iudin.viktor98@gmail.com
Sergey A. Volkovskiy — PhD, Scientific Researcher, Assistant, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, SC 57195476252, https://orcid.org/0000-0001-8462-5208, savolkovskii@itmo.ru
Artem S. Aleynik — PhD, Associate Professor, Head of Laboratory, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, SC 54793978900, https://orcid.org/0000-0002-7682-348X, artemal@itmo.ru

Статья поступила в редакцию 19.10.2024
Одобрена после рецензирования 15.05.2025
Принята к печати 20.07.2025

Received 19.10.2024
Approved after reviewing 15.05.2025
Accepted 20.07.2025

Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ
июль–август 2025 Том 25 № 4 http://ntv.ifmo.ru/
SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL OF INFORMATION TECHNOLOGIES, MECHANICS AND OPTICS
Jule–August 2025 Vol. 25 No 4 http://ntv.ifmo.ru/en/
ISSN 2226-1494 (print) ISSN 2500-0373 (online)

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ

doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-4-602-608
УДК 608.1

Нелинейное пропускание фторфосфатного стекла с квантовыми точками сульфидов и селенидов кадмия и свинца при воздействии фемтосекундного лазерного излучения ближнего инфракрасного диапазона

Николай Валентинович Никоноров[1], Елена Вячеславовна Колобкова[2], Антон Николаевич Цыпкин[3], Азат Олфатович Исмагилов[4], Егор Николаевич Опарин[5], Владимир Анатольевич Асеев[6]✉

[1,2,3,4,5,6] Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация
[2] Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), Санкт-Петербург, 190013, Российская Федерация

[1] nikonorov@oi.ifmo.ru, https://orcid.org/0000-0002-1341-067X
[2] kolobok106@rambler.ru, https://orcid.org/0000-0002-0134-8434
[3] tsypkinan@itmo.ru, https://orcid.org/0000-0002-9254-1116
[4] ismagilov.azat@itmo.ru, https://orcid.org/0000-0002-5844-2966
[5] oparine2@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-4009-7594
[6] aseev@oi.ifmo.ru✉, https://orcid.org/0000-0003-4098-2136

Аннотация

Введение. Исследованы нелинейно оптические свойства фторфосфатного стекла с квантовыми точками сульфидов и селенидов кадмия (CdS и CdSe) и свинца (PbS и PbSe) при воздействии импульсного фемтосекундного лазера ближнего инфракрасного диапазона. **Метод.** Фторфосфатные стекла с квантовыми точками получены методом высокотемпературного синтеза из шихтных реактивов с последующей дополнительной термообработкой. Нелинейное пропускание исследовалось при воздействии излучения импульсного лазера с длиной волны 1050 нм и длительностью 100 фс. **Основные результаты.** Показано, что во фторфосфатных стеклах с квантовыми точками CdS и CdSe пропускание на длине волны 1050 нм составляет 0,78 и 0,88 соответственно и практически не меняется в дапазоне падающей на стекло средней мощности фемтосекундного лазерного излучения от 30 до 2000 мВт. Для той же длины волны пропускание составило: 0,62 для образца с квантовыми точками PbS и 0,1 — для образца PbSe. Для образцов стекол с квантовыми точками PbS и PbSe обнаружено уменьшение пропускания с увеличением мощности лазерного излучения, т. е. нелинейное пропускание (лимитинг). Порог ограничения мощности проходящего через образец лазерного излучения, при которой пропускание уменьшается более чем на 20 %, для образца с квантовыми точками PbS составил 1265 мВт, а при входной мощности около 1530 мВт этот образец имел пропускание менее 0,1 %. Порог ограничения мощности лазерного излучения для образца с квантовыми точками PbSe составил 600 мВт, а при входной мощности около 750 мВт этот образец практически не пропускал лазерное излучение. **Обсуждение.** Фторфосфатные стекла с квантовыми точками PbS и PbSe можно использовать в качестве фильтров-лимитеров для защиты фотоприемных устройств от импульсного лазерного излучения в ближнем инфракрасном диапазоне.

Ключевые слова

фторфосфатное стекло, квантовые точки сульфида кадмия, квантовые точки сульфида свинца, квантовые точки селенида кадмия, квантовые точки селенида свинца, нелинейно оптическое пропускание, нелинейно оптический лимитер

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 24-43-20020).

Ссылка для цитирования: Никоноров Н.В., Колобкова Е.В., Цыпкин А.Н., Исмагилов А.О., Опарин Е.Н., Асеев В.А. Нелинейное пропускание фторфосфатного стекла с квантовыми точками сульфидов и селенидов кадмия и свинца при воздействии фемтосекундного лазерного излучения ближнего инфракрасного диапазона // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2025. Т. 25, № 4. С. 602–608. doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-4-602-608

© Никоноров Н.В., Колобкова Е.В., Цыпкин А.Н., Исмагилов А.О., Опарин Е.Н., Асеев В.А., 2025

Nonlinear transmission of fluorophosphate glass with quantum dots of cadmium and lead sulfides and selenides under near-IR femtosecond laser irradiation

Nikolay V. Nikonorov[1], Elena V. Kolobkova[2], Anton N. Tsypkin[3], Azat O. Ismagilov[4], Egor N. Oparin[5], Vladimir A. Aseev[6]✉

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

[2] Saint Petersburg State Institute of Technology, Saint Petersburg, 190013, Russian Federation

[1] nikonorov@oi.ifmo.ru, https://orcid.org/0000-0002-1341-067X

[2] kolobok106@rambler.ru, https://orcid.org/0000-0002-0134-8434

[3] tsypkinan@itmo.ru, https://orcid.org/0000-0002-9254-1116

[4] ismagilov.azat@itmo.ru, https://orcid.org/0000-0002-5844-2966

[5] oparine2@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-4009-7594

[6] aseev@oi.ifmo.ru✉, https://orcid.org/0000-0003-4098-2136

Abstract

Nonlinear optical properties of fluorophosphate glass with quantum dots of cadmium sulfides and selenides (CdS and CdSe) and lead (PbS and PbSe) were studied using a pulsed femtosecond near-IR laser. Fluorophosphate glasses with CdS, CdSe, PbS and PbSe quantum dots were obtained by high-temperature synthesis with additional heat treatment. Nonlinear absorption was studied under the action of a pulsed laser at a wavelength of 1050 nm and a duration of 100 fs. It is shown that the transmission at 1050 nm in fluorophosphate glasses with CdS and CdSe quantum dots is 0.78 and 0.88, respectively. In addition, increasing the average power of femtosecond laser radiation from 30 to 2000 mW does not lead to a change in their transmission. For this wavelength, the transmission was 0.1 for the sample with PbS nanocrystals and 0.65 for the sample with PbSe quantum dots. A decrease in transmission with increasing laser radiation power was shown for glass samples with PbS and PbSe quantum dots, i.e., nonlinear transmission (limiting) was observed. The threshold for limiting the power of laser radiation passing through the sample, i.e., the power at which the transmission decreases by more than 20 %, for the sample with PbS quantum dots was 1265 mW, and for an input power of about 1530 mW, this sample had a transmission of less than 0.1 %. The laser power limitation threshold for the PbSe quantum dot sample was 600 mW, and for an input power of about 750 mW it had a transmittance of less than 0.1 %. Fluorophosphate glasses with lead sulfide and selenide quantum dots can be used as limiting filters to protect photodetectors from pulsed laser radiation in the near IR range.

Keywords

fluorophosphate glass, cadmium sulfide quantum dots, lead sulfide quantum dots, cadmium selenide quantum dots, lead selenide quantum dots, nonlinear optical transmission, nonlinear optical limiter

Acknowledgements

The work was supported by the Russian Science Foundation (Project No. 24-43-20020).

For citation: Nikonorov N.V., Kolobkova E.V., Tsypkin A.N., Ismagilov A.O., Oparin E.N., Aseev V.A. Nonlinear transmission of fluorophosphate glass with quantum dots of cadmium and lead sulfides and selenides under near-IR femtosecond laser irradiation. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2025, vol. 25, no. 4, pp. 602–608 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-4-602-608

Введение

На сегодняшний день актуальной задачей является защита фотоприемников от воздействия импульсного лазерного излучения в видимом и ближнем инфракрасных (ИК) диапазонах. Одним из способов решения этой проблемы является применение в системах защиты фильтров-ограничителей (фильтров-лимитеров) лазерного излучения, в которых под действием лазерного излучения происходит ослабление пропускания фильтра за счет увеличения рассеяния или поглощения, происходящих в момент прохождения лазерного импульса через фильтр. Для создания таких фильтров-лимитеров применяются разнообразные материалы: хромоформы на основе органических красителей [1, 2], композитные среды с металлическими наночастицами [3], растворы фуллеренов [4, 5], жидкости с углеродными частицами [6–10]. Несмотря на широкую номенклатуру этих материалов, а также низкий порог ограничения мощности/энергии лазерного излучения (10^{-5}–10^{-6} Дж), при котором пропускание материалов начинает уменьшаться, и высокую величину ослабления проходящего лазерного импульса (более 1000 раз), практическое применение их для задач защиты от импульсного лазерного излучения ограничено ввиду низких эксплуатационных характеристик. Эти материалы имеют низкую механическую, термическую и оптическую прочности, низкую химическую устойчивость, в том числе, к воздействию влаги. Кроме того, в результате воздействия лазерного излучения такие среды могут изменять свои свойства (необратимо деградировать или разрушаться), что не допускает их многократное использование, т. е. эти среды, как правило, ориентированы на одноразовое применение. Наиболее привлекательным направлением является использование в качестве фильтров-лимитеров лазерного излучения стеклокристаллических материалов, в которых наблюдается нелинейно оптическое пропускание, и которые свободны от перечисленных недостатков. Так, например, в работе [11] предложено применять калиевоалюмоборатное стекло с нанокристаллами хлорида меди. В работе [11] показано, что при воздействии лазерного излучения длительностью 5 нс на длине волны 532 нм порог ограничения энергии лазерного излучения для исходного стекла составил $E = 3 \cdot 10^{-3}$ Дж, а для стекла с нанокристаллами хлорида меди $E = 5 \cdot 10^{-6}$ Дж, т. е. практически на три порядка

меньше. Также показано, что максимальная величина ослабления проходящего лазерного импульса с энергией 0,05 Дж для исходного стекла составляет 100 раз, а для стекла с нанокристаллами хлорида 1000 раз. По сравнению с известными средами, используемыми для нелинейно оптических ограничителей, калиевоалюмоборатное стекло с нанокристаллами хлорида меди имеет более высокие эксплуатационные характеристики (например, высокую механическую и термическую прочности, абразивостойкость и химическую устойчивость), которые близки к характеристикам коммерческих оптических стекол, и допускают его многократное использование.

Следует отметить, что вопрос о создании фильтров-лимитеров лазерного излучения фемтосекундной длительности для ближнего ИК диапазона пока остается нерешенным. В то же время в работах [12–14] были изучены способы синтеза и спектральные характеристики фторфосфатных (ФФ) стекол с квантовыми точками (КТ) сульфатов и селенидов кадмия и свинца (CdS, CdSe, PbS и PbSe) , а также показаны их высокие нелинейно оптические свойства и перспективы использования в качестве насыщающихся поглотителей [15, 16]. Было доказано, что ФФ стекла с CdS и CdSe характеризуются нелинейной восприимчивостью третьего порядка, в три раза превышающей этот параметр стандартных силикатных стекол [15].

В настоящей работе впервые проведены исследования нелинейного пропускания фторфосфатного стекла, легированного квантовыми точками селенидов и сульфидов кадмия и свинца, для создания на его основе нелинейно оптических фильтров-лимитеров импульсного лазерного излучения фемтосекундной длительности ближнего ИК диапазона.

Материалы и методы

В работе были синтезированы четыре ФФ стекла, активированные CdS, CdSe, PbS и PbSe. Исследовалось по одному образцу каждого стекла. Синтез проводился в электрической печи при температуре 1000 °С в течение 30 мин в закрытых стеклоуглеродных тиглях. Выработка стекломассы выполнялась на стеклоуглеродную пластину. В результате были получены прозрачные бесцветные стекла без кристаллической фазы (рис. 1, *a*). Размер заготовок составлял в диаметре 8–10 см толщиной 1–2 мм. КТ были выращены в процессе термообработки при температуре 390–400 °С в муфельной печи в течении 40 мин. Температура термической обработки определялась на основании данных дифференциальной сканирующей калориметрии с применением STA 449F1 Jupiter Nietzsche. Время термообработки варьировалось в пределах 30–60 мин. Для спектральных и нелинейно оптических измерений использовались полированные образцы с площадью поверхности не менее 1 см^2 и толщиной 1 мм (рис. 1).

Спектры поглощения образцов были измерены с применением спектрофотометра Lambda 900 PerkinElmer в диапазоне 300–2000 нм.

Принципиальная схема измерения нелинейного пропускания исследуемых образцов показана на рис. 2. Для исследования пропускания образцов использовалась лазерная фемтосекундная установка (LS) с параметрами: средняя мощность излучения до 2,0 Вт, длительность импульса 100 фс, частота повторения импульсов 70 МГц и центральная длина волны излучения 1050 нм («Авеста-Проект», Россия). Плавное изменение средней мощности лазерного излучения осуществлялось с помощью аттенюатора, состоящего из полуволновой пластинки (HWP) и поляризатора (PC). Для контроля средней мощности падающего излучения на образец в оптический путь помещалось зеркало (M), которое направляло лазерное излучение, через линзу (L1), на термоэлектрический датчик (PD1). Перед измерением средней мощности излучения, прошедшего через образец, зеркало (M) убиралось. После прошедшее через исследуемый образец (O) фемтосекундное излучение фокусировалось линзой (L2) на термоэлектрический датчик (PD2), где измерялась его средняя мощность. Пропускание определялось как отношение средней мощности прошедшего излучения к средней мощности падающего. За порог ограничения принималась средняя мощность падающего на образец лазерного излучения, при которой пропускание образца уменьшалось на 20 % относительно пропускания его исходного состояния.

Для исключения изменения свойств стекла под действием мощного лазерного излучения и возможного изменения пропускания стекла, эксперимент повторялся 5 раз в одной и той же области образца через определенные промежутки времени.

Результаты и обсуждение

На рис. 3 представлены спектры оптической плотности ФФ стекол с КТ CdS и CdSe (рис. 3, *a*), а также с КТ PbS и PbSe (рис. 3, *b*). На основании величины энер-

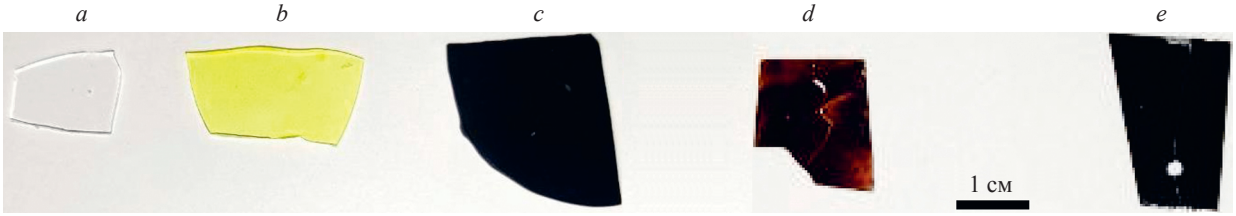


Рис. 1. Фотографии исследуемых образцов фторфосфатных стекол: исходный образец с прекурсорами Cd и S (*a*) и образцы с квантовыми точками после термообработки при 390 °С: CdS (*b*); CdSe (*c*); PbS (*d*); PbSe (*e*)

Fig. 1. Photographs of the samples of fluorophosphate glasses studied: the initial sample with Cd and S precursors (*a*) and samples with quantum dots after heat treatment at 390 °C: CdS (*b*); CdSe (*c*); PbS (*d*); PbSe (*e*)

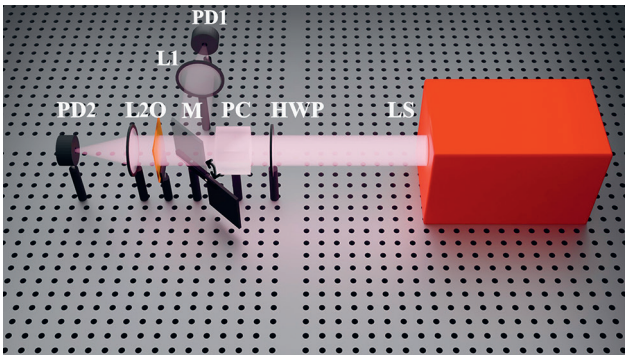


Рис. 2. Экспериментальная схема измерения пропускания образцов фторфосфатных стекол при воздействии фемтосекундного лазерного излучения на длине волны 1050 нм: LS — фемтосекундный лазер; HWP — четвертьволновая пластина; PC — поляризатор; O — исследуемый образец; L1,2 — линзы; PD1,2 — фотоприемники

Fig. 2. Experimental setup: LS — femtosecond laser; HWP — quarter-wave plate; PC — polarizer; O — sample under study; L1,2 — lenses; PD1,2 — photodetectors

гий первого возбужденного состояния экситона по методике, описанной в [17, 18], были определены размеры КТ CdS и CdSe, которые соответствовали 3,0 и 2,3 нм, а также КТ PbS и PbSe, которые составили около 3 нм. Из рис. 3, *a* видно, что длина волны первого возбужденного состояния экситона для ФФ стекол с КТ CdS составляет около 380 нм, а для ФФ стекол с КТ CdSe около 515 нм. При этом длина волны возбуждения лазерного излучения 1050 нм более чем в два раза превышает длину волны первого возбужденного состояния для ФФ стекол с КТ CdS и CdSe. В отличие от ФФ стекол с КТ CdS и CdSe принципиально другая ситуация наблюдается для ФФ стекол с КТ PbS и PbSe: длина волны возбуждения лазерного излучения 1050 нм близка к длинам волн для первого резонанса, которые составляют для ФФ стекол с КТ PbS около 980 нм, а для ФФ стекол с КТ PbSe около 1090 нм (рис. 3, *b*). Оптическая плотность на длине волны 1050 нм для стекла с КТ PbS равна 2,7, а для стекла с КТ PbSe равна 0,6. Таким образом, для стекол с КТ CdS, CdSe нелинейное поглощение может осуществляться только по двухфотонному механизму, в то время как для стекол с КТ PbS и PbSe должно происходить резонансное поглощение.

Исследования пропускания образцов ФФ стекол при воздействии лазерного излучения разной мощности показали следующие результаты. Для образцов с КТ CdS и CdSe пропускание практически не менялось в широких пределах входной мощности излучения от 30 до 2000 мВт на длине волны 1050 нм (рис. 4) и составляло 0,78 и 0,88 соответственно. В данном диапазоне мощностей наблюдалось линейное пропускание, т. е. выполнялся закон Бугера–Ламберта–Бера.

Более сложный характер зависимости пропускания от мощности лазерного излучения на длине волны 1050 нм имели образцы с КТ PbS и PbSe. Для данных образцов можно выделить два диапазона, когда пропускание не зависит от мощности падающего излучения (выполняется линейный закон Бугера–Ламберта–Бера) и уменьшается при увеличении мощности (закон Бугера–Ламберта–Бера не выполняется).

Для образца с КТ PbS начальное пропускание составило 0,62, при этом оно не изменялось в пределах диапазона мощности входного излучения 30–1265 мВт. При дальнейшем увеличении мощности лазерного излучения пропускание снижалось и при мощности 1650 мВт составило меньше 0,01. Аналогичный характер наблюдался для образца с PbSe: начальное пропускание составило 0,1, при этом оно не изменялось в пределах изменения мощности входного излучения 30–520 мВт. При дальнейшем увеличении мощности лазерного излучения пропускание снижалось и при мощности 720 мВт составляло уже меньше 0,01. Таким образом, порог ограничения мощности проходящего

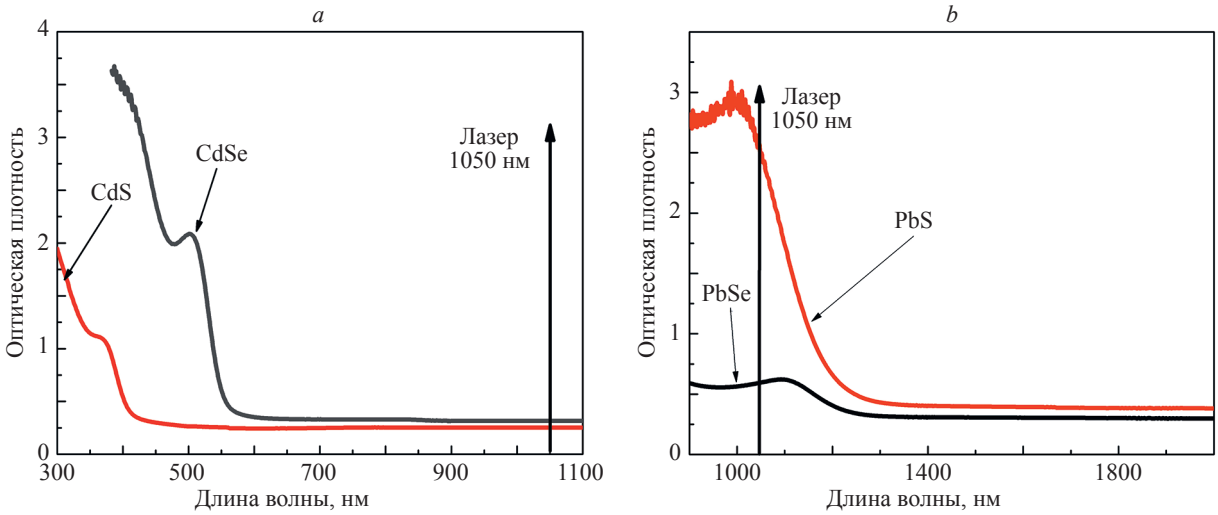


Рис. 3. Спектры оптической плотности фторфосфатных стекол с квантовыми точками CdS, CdSe (*a*), PbS и PbSe (*b*). Указано положение лазерного излучения (1050 нм) относительно полос поглощения стекол с квантовыми точками

Fig. 3. Absorbance spectra of fluorophosphate glasses with quantum dots CdS, CdSe (*a*), PbS and PbSe (*b*). The position of the laser radiation (1050 nm) is indicated relative to the absorption bands of glasses with quantum dots

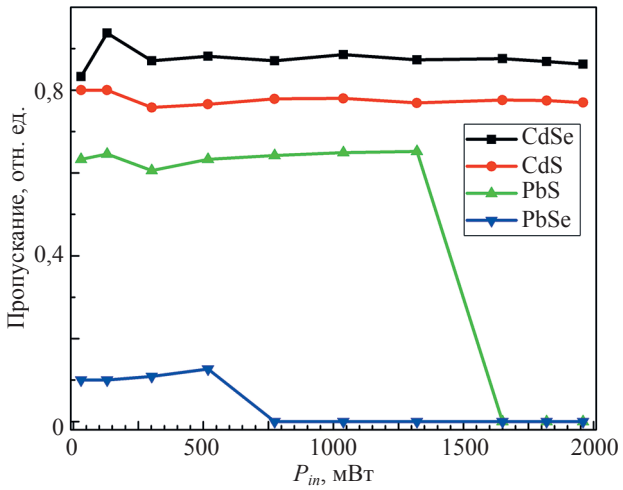


Рис. 4. Зависимость пропускания исследуемых образцов фторфосфатных стекол с квантовыми точками CdS и CdSe и PbS и PbSe от мощности (P_{in}) падающего на них фемтосекундного лазерного излучения с длиной волны 1050 нм

Fig. 4. Transmission dependence on laser radiation power in fluorophosphate glasses with CdS and CdSe and PbS and PbSe quantum dots

лазерного излучения для образца с КТ PbS составил 1450 мВт, а для образца с КТ PbSe — 670 мВт.

Отклонение от линейного закона Бугера–Ламберта–Бера связано с нелинейными процессами, наблюдаемыми при прохождении мощного лазерного излучения через стекло с КТ, и которое можно объяснить при помощи эффекта обратимого насыщаемого поглощения [19]. В этом случае при низкой интенсивности падающего излучения КТ поглощают слабо. При увеличении интенсивности начинают заселяться возбужденные состояния, которые имеют большее сечение поглощения, чем основное состояние, что может приводить к падению пропускания. Также важное значение может иметь наличие примесных уровней в запрещенной зоне полупроводниковых КТ PbS и PbSe, так называемые «глубокие примесные состояния», которые могут играть роль «мостиков» для электронов при нелинейном поглощении. С них может осуществляться переход электронов в зону проводимости при высоких интенсивностях лазерного излучения. Известно, что наличие таких примесных уровней при высоких интенсивностях проявляется также, как и двухфотонное поглощение [12–18, 20–25]. Отметим, что более подробное изучение механизмов нелинейного пропускания требует отдельных исследований.

В результате проведения экспериментов не наблюдались эффекты, связанные с образованием дефектов, деформацией или оптическим разрушением ФФ стекла при воздействии лазерного излучения.

Таким образом, можно заключить, что ФФ стекла с КТ PbS и PbSe имеют нелинейный характер уменьшения пропускания от мощности падающего излучения фемтосекундной длительности, и такое ограничение мощности можно использовать для создания эффективных фильтров-лимитеров для защиты фотоприемных устройств, работающих в ближнем ИК диапазоне.

Следует отметить следующие достоинства ФФ стекол с КТ PbS и PbSe по сравнению с известными средами, используемыми для нелинейно оптических фильтров-ограничителей. Прежде всего, это высокая объемная доля КТ CdS, CdSe, PbS и PbSe, которая может быть реализована во ФФ стекле по сравнению с известными силикатными матрицами вследствие сохранения при синтезе в расплаве ФФ стекол высоких концентраций серы и селена. Эта особенность ФФ стекол позволяет формировать КТ в широких диапазонах размеров и концентраций при использовании значительно более низких температур синтеза стекол и меньшего времени термообработки, по сравнению с технологическими условиями синтеза силикатных стекол. Также можно отметить высокую механическую и термическую прочности ФФ стекла. Например, в работах [26, 27] показано, что эксплуатационные характеристики ФФ стекла близки к характеристикам лазерных фосфатных стекол. Кроме того, ФФ стекло не изменяет свои свойства при его хранении, т. е. обладает высокой стойкостью к атмосферным воздействиям, а также не разрушается при воздействии на него лазерного импульсного излучения с высокими интенсивностями [26, 27]. Исследованные ФФ стекла по сравнению с известными «одноразовыми» средами для нелинейно оптических фильтров-ограничителей (красителями, растворами фуллеренов и т. д.) допускают их многократное использование.

Заключение

Исследованы нелинейное пропускание фторфосфатного стекла с квантовыми точками сульфидов и селенидов кадмия и свинца при воздействии импульсного фемтосекундного (100 фс) лазера ближнего инфракрасного диапазона с длиной волны 1050 нм. Показано, что во фторфосфатных стеклах с квантовыми точками сульфида и селенида кадмия пропускание на длине волны 1050 нм практически не изменяется при различной мощности (от 30 до 2000 мВт) падающего излучения и составляет, соответственно, 0,78 и 0,88. Образцы с квантовыми точками сульфида и селенида свинца показывают нелинейных характер зависимости пропускания от мощности лазерного излучения. Порог уменьшения (ограничения) мощности проходящего через образец лазерного излучения, при которой пропускание уменьшалось более чем на 20 %, для образца с квантовыми точками сульфида свинца составил 1265 мВт, а при входной мощности около 1530 мВт этот образец практически не пропускал лазерное излучение. Порог ограничения мощности лазерного излучения для образца с квантовыми точками селенида свинца составил 600 мВт, а при входной мощности порядка 750 мВт этот образец практически не пропускал лазерное излучение. Можно сделать вывод о том, что фторфосфатные стекла с квантовыми точками сульфида и селенида свинца можно использовать в качестве фильтров-лимитеров для защиты фотоприемных устройств от импульсного лазерного излучения фемтосекундной длительности в ближнем инфракрасном диапазоне.

Литература

1. Shirk J.S., Pong R.G.S., Flom S.R., Boyle M.E., Snow A.W. Materials for reverse saturable absorption optical limiters // Materials Research Society Symposium Proceedings. 1994. V. 374. P. 201–209. https://doi.org/10.1557/PROC-374-201
2. Hollins R.C. Materials for optical limiters // Current Opinion in Solid State and Materials Science. 1999. V. 4. N 2. P. 189–196. https://doi.org/10.1016/S1359-0286(99)00009-1
3. Wang J., Blau W.J. Inorganic and hybrid nanostructures for optical limiting // Journal of Optics A: Pure and Applied Optics. 2009. V. 11. N 2. P. 024001. https://doi.org/10.1088/1464-4258/11/2/024001
4. Kost A., Jensen J.E., Klein M.B., McCahon S.W., Haeri M.B., Ehritz M.E. Optical limiting with C60 solutions // Proceedings of SPIE. 1994. V. 2229. P. 78–90.
5. Kost A., Jensen J.E., Klein M.B., Withers J.C., Loufty R.O., Haeri M.B., Ehritz M.E. Fullerene-based large-area passive broadband laser filters // Proceedings of SPIE. 1994. V. 2284. P. 208–219. https://doi.org/10.1117/12.196131
6. Vincent D., Petit S., Chin S.L. Optical limiting studies in a carbon-black suspension for subnanosecond and subpicosecond laser pulses // Applied Optics. 2002. V. 41. N 15. P. 2944–2946. https://doi.org/10.1364/AO.41.002944
7. Wang J., Chen Y., Blau W.J. Carbon nanotubes and nanotube composites for nonlinear optical devices // Journal of Materials Chemistry. 2009. V. 19. N 40. P. 7425–7443. https://doi.org/10.1039/b906294g
8. Koudoumas E., Kokkinaki O., Konstantaki M., Couris S., Korovin S., Detkov P., Kuznetsov V., Pimenov S., Pustovoi V. Onion-like carbon and diamond nanoparticles for optical limiting // Chemical Physics Letters. 2002. V. 357. N 5–6. P. 336–340. https://doi.org/10.1016/s0009-2614(02)00557-2
9. Wang J., Früchtl D., Blau W.J. The importance of solvent properties for optical limiting of carbon nanotube dispersions // Optics Communications. 2010. V. 283. N 3. P. 464–468. https://doi.org/10.1016/j.optcom.2009.10.020
10. Venediktova A.V., Vlasov A.Y., Obraztsova E.D., Videnichev D.A., Kislyakov I.M., Sokolova E.P. Stability and optical limiting properties of a single wall carbon nanotubes dispersion in a binary water-glycerol solvent // Applied Physics Letters. 2012. V. 100. N 25. P. 251903. https://doi.org/10.1063/1.4729790
11. Ширшнев П.С., Никоноров Н.В., Соболев Д.И., Ким А.А., Кисляков И.М., Поваров С.С., Белоусова И.М. Нелинейно оптический лимитер импульсного лазерного излучения на основе калиевоалюмоборатного стекла с нанокристаллами хлорида меди // Оптический журнал. 2017. Т. 84. № 10. С. 69–74.
12. Lipovskii A.A., Yakovlev I.E., Kolobkova E.V., Petrikov V.D. Formation and growth of semiconductor nanocrystals in phosphate glass matrix // Journal of the European Ceramic Society. 1999. V. 19. N 6-7. P. 865–869. https://doi.org/10.1016/S0955-2219(98)00333-1
13. Kolobkova E.V., Lipovskii A.A., Petrikov V.D., Melekhin V.G. Fluorophosphate glasses with quantum dots based on lead sulfide // Glass Physics and Chemistry. 2002. V. 28. N 4. P. 251–255. https://doi.org/10.1023/A:1019918530283
14. Kolobkova E.V., Polyakova A.V., Abdrshin A.N., Nikonorov N.V., Aseev V.A. Nanostructured glass ceramic based on fluorophosphate glass with PbSe quantum dots // Glass Physics and Chemistry. 2015. V. 41. N 1. P. 127–131. https://doi.org/10.1134/S1087659615010137
15. Melekhin V.G., Kolobkova E.V., Lipovskii A.A., Petrikov V.D., Malyarevich A.M., Savitsky V.G. Fluorophosphate glasses doped with PbSe quantum dots and their nonlinear optical characteristics // Glass Physics and Chemistry. 2008. V. 34. N 4. P. 351–355. https://doi.org/10.1134/s1087659608040020
16. Vaynberg B., Matusovsky M., Rosenbluh M., Kolobkova E., Lipovskii A. High optical nonlinearity of CdSxSe1-X microcrystals in fluorine-phosphate glass // Optics Communications. 1996. V. 132. N 3-4. P. 307–310. https://doi.org/10.1016/0030-4018(96)00373-2
17. William Yu W., Lianhua Qu, Wenzhuo Guo, and Xiaogang Peng. Experimental determination of the extinction coefficient of CdTe, CdSe, and CdS nanocrystals // Chemistry of Materials. 2003. V. 15. N 14. P. 2854–2860. https://doi.org/10.1021/cm034081k
18. Allan G., Delerue C. Confinement effects in PbSe quantum wells and nanocrystals // Physical Review B. 2004. V. 70. N 24. P. 245321. https://doi.org/10.1103/PhysRevB.70.245321
19. Kolobkova E., Lipatova Z., Abdrshin A., Nikonorov N. Luminescent properties of fluorine phosphate glasses doped with PbSe and PbS

References

1. Shirk J.S., Pong R.G.S., Flom S.R., Boyle M.E., Snow A.W. Materials for reverse saturable absorption optical limiters. *Materials Research Society Symposium Proceedings*, 1994, vol. 374, pp. 201–209. https://doi.org/10.1557/PROC-374-201
2. Hollins R.C. Materials for optical limiters. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 1999, vol. 4, no. 2, pp. 189–196. https://doi.org/10.1016/S1359-0286(99)00009-1
3. Wang J., Blau W.J. Inorganic and hybrid nanostructures for optical limiting. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 2009, vol. 11, no. 2, pp. 024001. https://doi.org/10.1088/1464-4258/11/2/024001
4. Kost A., Jensen J.E., Klein M.B., McCahon S.W., Haeri M.B., Ehritz M.E. Optical limiting with C60 solutions. *Proceedings of SPIE*, 1994, vol. 2229, pp. 78–90.
5. Kost A., Jensen J.E., Klein M.B., Withers J.C., Loufty R.O., Haeri M.B., Ehritz M.E. Fullerene-based large-area passive broadband laser filters. *Proceedings of SPIE*, 1994, vol. 2284, pp. 208–219. https://doi.org/10.1117/12.196131
6. Vincent D., Petit S., Chin S.L. Optical limiting studies in a carbon-black suspension for subnanosecond and subpicosecond laser pulses. *Applied Optics*, 2002, vol. 41, no. 15, pp. 2944–2946. https://doi.org/10.1364/AO.41.002944
7. Wang J., Chen Y., Blau W.J. Carbon nanotubes and nanotube composites for nonlinear optical devices. *Journal of Materials Chemistry*, 2009, vol. 19, no. 40, pp. 7425–7443. https://doi.org/10.1039/b906294g
8. Koudoumas E., Kokkinaki O., Konstantaki M., Couris S., Korovin S., Detkov P., Kuznetsov V., Pimenov S., Pustovoi V. Onion-like carbon and diamond nanoparticles for optical limiting. *Chemical Physics Letters*, 2002, vol. 357, no. 5–6, pp. 336–340. https://doi.org/10.1016/s0009-2614(02)00557-2
9. Wang J., Früchtl D., Blau W.J. The importance of solvent properties for optical limiting of carbon nanotube dispersions. *Optics Communications*, 2010, vol. 283, no. 3, pp. 464–468. https://doi.org/10.1016/j.optcom.2009.10.020
10. Venediktova A.V., Vlasov A.Y., Obraztsova E.D., Videnichev D.A., Kislyakov I.M., Sokolova E.P. Stability and optical limiting properties of a single wall carbon nanotubes dispersion in a binary water-glycerol solvent. *Applied Physics Letters*, 2012, vol. 100, no. 25, pp. 251903. https://doi.org/10.1063/1.4729790
11. Shirshnev P.S., Nikonorov N.V., Sobolev D.I., Kim A.A., Kislyakov I.M., Povarov S.S., Belousova I.M. Nonlinear optical limiter of pulsed laser radiation based on potassium–aluminum–borate glass with copper chloride nanocrystals. *Journal of Optical Technology*. 2017, vol. 84, no. 10, pp. 705–709. https://doi.org/10.1364/JOT.84.000705
12. Lipovskii A.A., Yakovlev I.E., Kolobkova E.V., Petrikov V.D. Formation and growth of semiconductor nanocrystals in phosphate glass matrix. *Journal of the European Ceramic Society*, 1999, vol. 19, no. 6-7, pp. 865–869. https://doi.org/10.1016/S0955-2219(98)00333-1
13. Kolobkova E.V., Lipovskii A.A., Petrikov V.D., Melekhin V.G. Fluorophosphate glasses with quantum dots based on lead sulfide. *Glass Physics and Chemistry*, 2002, vol. 28, no. 4, pp. 251–255. https://doi.org/10.1023/A:1019918530283
14. Kolobkova E.V., Polyakova A.V., Abdrshin A.N., Nikonorov N.V., Aseev V.A. Nanostructured glass ceramic based on fluorophosphate glass with PbSe quantum dots. *Glass Physics and Chemistry*, 2015, vol. 41, no. 1, pp. 127–131. https://doi.org/10.1134/S1087659615010137
15. Melekhin V.G., Kolobkova E.V., Lipovskii A.A., Petrikov V.D., Malyarevich A.M., Savitsky V.G. Fluorophosphate glasses doped with PbSe quantum dots and their nonlinear optical characteristics. *Glass Physics and Chemistry*, 2008, vol. 34, no. 4, pp. 351–355. https://doi.org/10.1134/s1087659608040020
16. Vaynberg B., Matusovsky M., Rosenbluh M., Kolobkova E., Lipovskii A. High optical nonlinearity of CdSxSe1-X microcrystals in fluorine-phosphate glass. *Optics Communications*, 1996, vol. 132, no. 3-4, pp. 307–310. https://doi.org/10.1016/0030-4018(96)00373-2
17. William Yu W., Lianhua Qu, Wenzhuo Guo, and Xiaogang Peng. Experimental determination of the extinction coefficient of CdTe, CdSe, and CdS nanocrystals. *Chemistry of Materials*, 2003, vol. 15, no. 14, pp. 2854–2860. https://doi.org/10.1021/cm034081k
18. Allan G., Delerue C. Confinement effects in PbSe quantum wells and nanocrystals. *Physical Review B*, 2004, vol. 70, no. 24, pp. 245321. https://doi.org/10.1103/PhysRevB.70.245321

quantum dots // Optical Materials. 2017. V. 65. P. 124–128. https://doi.org/10.1016/j.optmat.2016.09.033
20. Boyd R.W., Gaeta A.L., Giese E. Nonlinear optics // Springer Handbook of Atomic, Molecular, and Optical Physics. 2023. P. 1097–1110. https://doi.org/10.1007/978-3-030-73893-8_76
21. Yu J., Durmusoglu E.G., Ren Y., Fang W., Zhou Y., Chu L., Liu B., Demir H.V. Dual type-II colloidal quantum wells for efficient nonlinear optical limiting // ACS Nano. 2025. V. 19. N 9. P. 9273–9281. https://doi.org/10.1021/acsnano.5c00391
22. Дворников Д.П., Ивченко Е.Л., Першин В.В., Ярошецкий И.Д. О влиянии переходов через глубокие примесные центры на процесс нелинейного поглощения в полупроводниках // Физика и техника полупроводников. 1976. Т. 10. № 12. С. 2316–2320.
23. Грасюк А.З., Зубарев И.Г., Миронов А.Б., Полуэктов И.А. О спектре двухфотонного межзонного поглощения лазерного излучения в GaAs // Физика и техника полупроводников. 1976. Т. 10. № 2. С. 262–270.
24. Арешев И.И. О двухфотонном межзонном поглощении лазерного излучения в полупроводниках с участием примесных уровней // Физика и техника полупроводников. 1977. Т. 11. № 5. С. 962–964.
25. Балтрамеюнас Р.А., Вайткус Ю.Ю., Гаврюшин В.И. Поглощение света неравновесными двухфотонно генерируемыми свободными и локализованными носителями носителями в монокристаллах ZnTe // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 1984. Т. 87. № 1. С. 74–83.
26. Kolobkova E., Alkhlef A., Mironov L.Y., Bogdanov O. Effect of the phosphate content on the spectroscopic and lasing properties of Er^{3+}/Yb^{3+}-doped fluorophosphate glasses // Ceramics International. 2020. V. 46. N 16. Part B. P. 26396–26402. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.04.221
27. Bogdanov O.A., Kolobkova E.V., Perevislov S.N. Thermomechanical properties and structure of fluorophosphate glasses activated with Nd^{3+} at different concentrations of $Ba(PO_3)_2$ // Glass Physics and Chemistry. 2021. V. 47. N 4. P. 334–339. https://doi.org/10.1134/S1087659621040052
19. Kolobkova E., Lipatova Z., Abdrshin A., Nikonorov N. Luminescent properties of fluorine phosphate glasses doped with PbSe and PbS quantum dots. *Optical Materials*, 2017, vol. 65, pp. 124–128. https://doi.org/10.1016/j.optmat.2016.09.033
20. Boyd R.W., Gaeta A.L., Giese E. Nonlinear optics. *Springer Handbook of Atomic, Molecular, and Optical Physics*, 2023, pp. 1097–1110. https://doi.org/10.1007/978-3-030-73893-8_76
21. Yu J., Durmusoglu E.G., Ren Y., Fang W., Zhou Y., Chu L., Liu B., Demir H.V. Dual type-II colloidal quantum wells for efficient nonlinear optical limiting. *ACS Nano*, 2025, vol. 19, no. 9, pp. 9273–9281. https://doi.org/10.1021/acsnano.5c00391
22. Dvornikov D.P., Ivchenko E.L., Pershin V.V., Yaroshetskii I.D. The influence of transitions through deep impurity centers on the process of nonlinear absorption in semiconductors. *Fizika i tehnika poluprovodnikov*, 1976, vol. 10, no. 12, pp. 2316–2320. (in Russian)
23. Grasyuk A.Z., Zubarev I.G., Mironov A.B., Poluéktov I.A. The spectrum of a two-photon interband impurity absorption of laser radiation in GaAs. *Fizika i tehnika poluprovodnikov*, 1976, vol. 10, no. 2, pp. 262–270. (in Russian)
24. Areshev I.I. Two-photon interband absorption of laser radiation in semiconductors with the participation of impurity levels. *Fizika i tehnika poluprovodnikov*, 1977, vol. 11, no. 5, pp. 962–964. (in Russian)
25. Baltraneyunas R.A., Vaitkus Yu.Yu., Gavryushin V.I. Light absorption by nonequilibrium, two-photon-generated, free and localized carriers in ZnTe. *Soviet Physics — JETP*, 1984. vol. 60, no. 1, pp. 43–48.
26. Kolobkova E., Alkhlef A., Mironov L.Y., Bogdanov O. Effect of the phosphate content on the spectroscopic and lasing properties of Er^{3+}/Yb^{3+}-doped fluorophosphate glasses. *Ceramics International*, 2020, vol. 46, no. 16, part B, pp. 26396–26402. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.04.221
27. Bogdanov O.A., Kolobkova E.V., Perevislov S.N. Thermomechanical properties and structure of fluorophosphate glasses activated with Nd^{3+} at different concentrations of $Ba(PO_3)_2$. *Glass Physics and Chemistry*, 2021, vol. 47, no. 4, pp. 334–339. https://doi.org/10.1134/S1087659621040052

Авторы

Никоноров Николай Валентинович — доктор физико-математических наук, профессор, ведущий профессор, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, sc 7003772604, https://orcid.org/0000-0002-1341-067X, nikonorov@oi.ifmo.ru

Колобкова Елена Вячеславовна — доктор химических наук, профессор, профессор, Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), Санкт-Петербург, 190013, Российская Федерация; профессор практики, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, sc 57604636700, https://orcid.org/0000-0002-0134-8434, kolobok106@rambler.ru

Цыпкин Антон Николаевич — доктор физико-математических наук, доцент, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, sc 56366230300, https://orcid.org/0000-0002-9254-1116, tsypkinan@itmo.ru

Исмагилов Азат Олфатович — кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, sc 57195673891, https://orcid.org/0000-0002-5844-2966, ismagilov.azat@itmo.ru

Опарин Егор Николаевич — аспирант, научный сотрудник, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, sc 57209803630, https://orcid.org/0000-0002-4009-7594, oparine2@gmail.com

Асеев Владимир Анатольевич — кандидат физико-математических наук, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, sc 7004254881, https://orcid.org/0000-0003-4098-2136, aseev@oi.ifmo.ru

Authors

Nikolay V. Nikonorov — D.Sc. (Physics & Mathematics), Full Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, sc 7003772604, https://orcid.org/0000-0002-1341-067X, nikonorov@oi.ifmo.ru

Elena V. Kolobkova — D.Sc. (Chemistry), Full Professor, Saint Petersburg State Institute of Technology; Saint Petersburg, 190013, Russian Federation; Professor of Practice, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, sc 57604636700, https://orcid.org/0000-0002-0134-8434, kolobok106@rambler.ru

Anton N. Tsypkin — D.Sc. (Physics & Mathematics), Associate Professor, Associate Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, sc 56366230300, https://orcid.org/0000-0002-9254-1116, tsypkinan@itmo.ru

Azat O. Ismagilov — PhD (Physics & Mathematics), Scientific Researcher, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, sc 57195673891, https://orcid.org/0000-0002-5844-2966, ismagilov.azat@itmo.ru

Egor N. Oparin — PhD Student, Scientific Researcher, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, sc 57209803630, https://orcid.org/0000-0002-4009-7594, oparine2@gmail.com

Vladimir A. Aseev — PhD (Physics & Mathematics), Associate Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, sc 7004254881, https://orcid.org/0000-0003-4098-2136, aseev@oi.ifmo.ru

Статья поступила в редакцию 12.04.2025
Одобрена после рецензирования 08.06.2025
Принята к печати 21.07.2025

Received 12.04.2025
Approved after reviewing 08.06.2025
Accepted 21.07.2025

Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ
июль–август 2025 Том 25 № 4 http://ntv.ifmo.ru/
SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL OF INFORMATION TECHNOLOGIES, MECHANICS AND OPTICS
Jule–August 2025 Vol. 25 No 4 http://ntv.ifmo.ru/en/
ISSN 2226-1494 (print) ISSN 2500-0373 (online)

doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-4-609-616
УДК 51-74, 534.08, 535.231.6

Методика оценки чувствительности к вибрации оптических компонентов, основанная на вейвлет-анализе вибрационно-модулированного излучения

Роман Михайлович Смертин[1]✉, Илларион Леонидович Никулин[2]

[1] Пермская научно-производственная приборостроительная компания, Пермь, 614990, Российская Федерация
[1,2] Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, 614990, Российская Федерация

[1] romsmerm@gmail.com✉, https://orcid.org/0009-0002-7329-9413
[2] nil@pstu.ru, https://orcid.org/0000-0002-8496-7942

Аннотация

Введение. Вибрации навигационных систем, в частности, волоконно-оптических гироскопов, влияют на интенсивность излучения, проходящего через их оптические компоненты. Это приводит к погрешности позиционирования транспортных средств. На данный момент механизм влияния вибраций на волоконно-оптические гироскопы и причины их высокой вибрационной чувствительности не до конца изучены. В настоящей работе исследована амплитудная модуляция оптического сигнала, вызванная вибрацией пассивных оптических компонентов. **Метод.** Методика оценки чувствительности к вибрации включает регистрацию на экспериментальном стенде излучения, проходящего через оптические компоненты при их колебаниях с частотой от 20 до 2000 Гц и амплитудой 5 g. Алгоритм обработки результатов измерений основан на вейвлет-преобразовании, а также быстром преобразовании Фурье и обеспечивает поиск и оценку вызванной вибрацией амплитудной модуляции проходящего излучения. **Основные результаты.** Приведены типичные случаи временной развертки сигналов, проходящих через оптические компоненты. Показано влияние вибрации на излучение. Обнаружена модуляция оптического сигнала, прошедшего через Y-разветвители различных производителей, которая проявляется как в виде периодического изменения измеряемой мощности излучения, так и в виде изменения коэффициента деления. Приведен алгоритм, позволяющий проводить ускоренный анализ за счет рационального отбора данных для последующего вейвлет-анализа. **Обсуждение.** Предложенная методика исследования модуляции на основе вейвлет-анализа позволяет оценить чувствительность оптических компонентов к вибрации, выделить резонансные частоты для Y-разветвителей. Предложенный программный комплекс позволяет определять модуляцию, составляющую менее 0,1 % от начальной мощности.

Ключевые слова

постобработка сигнала, метод сканирующей частоты, быстрое преобразование Фурье, оптические разветвители, вибрация, модуляция мощности

Ссылка для цитирования: Смертин Р.М., Никулин И.Л. Методика оценки чувствительности к вибрации оптических компонентов, основанная на вейвлет-анализе вибрационно-модулированного излучения // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2025. Т. 25, № 4. С. 609–616. doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-4-609-616

Methodology for estimation of sensitivity to vibration of optical components based on wavelet analysis of vibration-modulated radiation

Roman M. Smertin[1]✉, Illarion L. Nikulin[2]

[1] Perm Scientific-Industrial Instrument Making Company (PAO PNPPK), Perm, 614990, Russian Federation
[1,2] Perm National Research Polytechnic University, Perm, 614990, Russian Federation

[1] romsmerm@gmail.com✉, https://orcid.org/0009-0002-7329-9413
[2] nil@pstu.ru, https://orcid.org/0000-0002-8496-7942

© Смертин Р.М., Никулин И.Л., 2025

Abstract
The vibrations of navigation systems, including fiber optic gyroscopes, affect the intensity of radiation passing through their optical components. This can lead to positioning errors in vehicles. The mechanism by which vibrations influence fiber optic gyroscopes and the reasons for their high vibration sensitivity are still not fully understood. This paper investigates the amplitude modulation of the optical signal caused by the vibration of passive optical components. The sensitivity to vibration is evaluated by registering optical power passing through components on an experimental stand while they vibrate at frequencies between 20 and 2000 Hz with amplitude of 5 g. The measurement results are processed using a wavelet transform and fast Fourier transform algorithm. The algorithm estimates and searches for vibration-induced modulation of transmitted radiation. Typical cases of the time sweep of signals passing through optical components are presented. The influence of vibration on transmitted radiation is demonstrated. Modulation of the optical signal passing through Y-splitters from different manufacturers is detected, manifesting as periodic changes in the measured radiation power and changes in the split ratio. An algorithm is presented that enables accelerated analysis by selecting data rationally for subsequent wavelet analysis. The proposed methodology for analyzing modulation based on wavelet analysis enables the sensitivity of optical components to vibration to be estimated and resonant frequencies for Y-splitters to be selected. This methodology enables the identification of modulation levels below 0.1 % of the initial power.

Keywords
signal post-processing, frequency scanning method, fast Fourier transform, optical splitters, vibration, power modulation

For citation: Smertin R.M., Nikulin I.L. Methodology for estimation of sensitivity to vibration of optical components based on wavelet analysis of vibration-modulated radiation. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2025, vol. 25, no. 4, pp. 609–616 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-4-609-616

Введение

Широкое применение волоконно-оптических гироскопов (ВОГ) в навигационных системах воздушных, водных и наземных транспортных средств способствует развитию и приводит к повышению требований к точности и надежности таких систем. Одной из причин чувствительности навигационных систем к вибрации, оказывающей неустранимое вредное воздействие и приводящей к снижению точности показаний, считается то, что само оптическое волокно является датчиком вибрации [1–3]. В связи с этим снижение чувствительности ВОГ к вибрации является актуальной задачей исследования. Причем наиболее простые методы снижения виброчувствительности, связанные с увеличением массы или габаритов системы [4, 5], в случае летательных аппаратов обычно не применимы.

В работах [6–8] исследована проблема вибрационного смещения показаний ВОГ. В работе [6] доказано, что ошибка возникает из-за изменения характеристик оптического волокна в результате возникающих от вибрации механических напряжений. В работах [7, 8] показано, что изменения оптической мощности излучения от источника, вызванные вибрацией, могут приводить к значительному смещению измеряемой угловой скорости и ошибкам навигации. Кроме источника излучения (активного компонента), вызванная вибрацией модуляция мощности в пассивных компонентах также может привести к ошибкам. В настоящее время механизм влияния вибраций на ВОГ и причины его высокой виброчувствительности не до конца изучены. В доступных научных работах не представлены методики измерения и обработки сигнала, позволяющие количественно оценить чувствительность к вибрации оптических компонентов ВОГ.

Целью настоящей работы является разработка методики количественной оценки влияния вибрации на характеристики отдельных оптических компонентов, а также ее апробация.

В работе приведено описание разработанного экспериментального стенда, позволяющего создавать вибрацию различной частоты отдельных компонентов ВОГ, а также регистрировать мощность излучения, проходящего через оптические компоненты. На основе предложенной методики обработки сигнала разработан программный комплекс обработки экспериментальных данных, позволяющий выявлять частоты, при которых вибрация приводит к изменению характеристик оптических компонентов.

Методика исследования

Выполнено исследование амплитудной модуляции сигнала, вызванной вибрацией — периодическое изменение оптических характеристик, например коэффициента деления Y-разветвителя, с частотой, близкой к частоте воздействия или кратной ей.

Предлагаемая методика оценки чувствительности к вибрации заключается в следующем. На первом этапе на измерительном стенде формируется массив данных мощности проходящего через оптические компоненты излучения при различных частотах вибрационного воздействия. На втором этапе с помощью программного комплекса происходит постобработка полученного массива и выявляются диапазоны частот, в которых изменения характеристик оптических компонентов превышают допустимые значения.

Измерительный стенд. Для исследования влияния вибрации разработан и реализован испытательный стенд, схема которого представлена на рис. 1. Излучение от источника *1* поступает на разветвитель *2*, где делится на четыре канала: первый канал – опорный, нужен для выявления изменения интенсивности излучения от источника. Излучение со следующих трех каналов подается на испытуемые образцы *3*, установленные на вибростенд *4*. В качестве образцов использованы Y-разветвители с коэффициентом

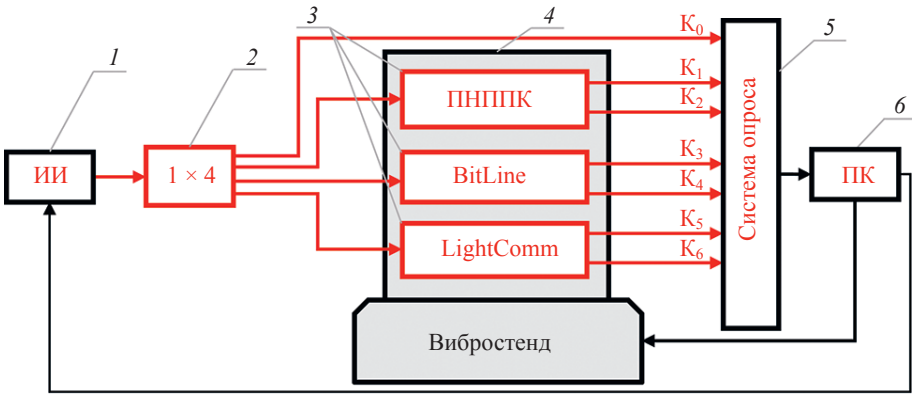


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: *1* — источник излучения (ИИ) 1550 нм; *2* — оптический разветвитель 1 × 4; *3* — испытуемые образцы; *4* — вибростенд; *5* — измеритель оптической мощности; *6* — персональный компьютер (ПК); $K_0 \ldots K_6$ — измерительные каналы (K_0 — опорный)

Fig. 1. Schematic diagram of the experimental setup: *1* — optical source (1550 nm); *2* — optical splitter 1 × 4; *3* — test samples; *4* — vibration test bench; *5* — optical power meter; *6* — personal computer. $K_0 \ldots K_6$ measuring channels (K_0 — reference)

деления 50/50, производимые компаниями ПНППК[1], BitLine[2] и LightComm[3]. Разделенные на каждом образце сигналы, а также опорный сигнал, поступают на многоканальный измеритель мощности *5*, результаты измерения мощности записываются и обрабатываются на персональном компьютере *6*.

Немодулированный оптический сигнал пропускается через разветвители, на которые оказывается вибрационное воздействие. Мощность прошедшего излучения регистрируется и записывается измерителем оптической мощности с частотой опроса $F_{\text{опр}} = 20$ кГц. В испытании используется метод сканирующей частоты: частоты воздействия $F_{\text{вне}}$ изменяются от 20 Гц до 2000 Гц с виброускорением $a = 5$ g. Такой диапазон выбран в соответствие с требованиями, близкими к стандартам NASA[4]. Частота вибрации определяется временным профилем $F_{\text{вне}}(t)$ (рис. 2). Разностный сигнал мощности $\Delta P_i(t)$ записывается непрерывно.

Программный комплекс. Обработка экспериментальных данных реализована в пакете прикладных программ MATLAB с использованием его специализированных функций.

Алгоритм постобработки состоит в следующем. Сначала к полученным данным применяется процедура согласования мощностей, которая заключается в вычитании мощности нормированного опорного пучка:

$$\Delta P_i(t) = P_i(t) - P_o(t)\frac{P_{i,t=0}}{P_{o,t=0}}, \qquad (1)$$

где $\Delta P_i(t)$ — разность мощностей i-го и опорного каналов; $P_i(t)$ — сигнал с объекта, подвергнутого воздействию; $P_o(t)$ — опорный сигнал; $P_{i,t=0}$ и $P_{o,t=0}$ — сигналы, полученные без вибрации. Множитель $P_{i,t=0}/P_{o,t=0}$ обеспечивает соответствие масштабов.

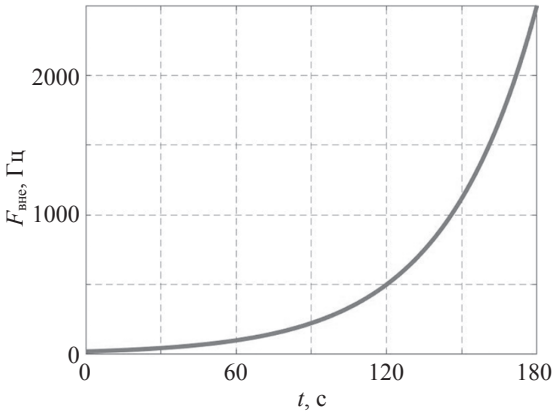


Рис. 2. Зависимость частоты вибрации $F_{\text{вне}}$ от времени t

Fig. 2. Dependence of vibration frequency $F_{\text{вне}}$ vs. time t

Полученные временные зависимости $\Delta P_i(t)$ разбиваются на интервалы конечной ширины $\Delta P_i(t)$, $t \in [t'; t' + \Delta t']$ шириной $\Delta t' = 1$ с. К этим интервалам применяется быстрое преобразование Фурье, выполненное на основе работы [9] с помощью функции FFT (Fast Furrier Transform) прикладного программного обеспечения MATLAB.

Быстрое преобразование Фурье применяется к небольшим временным интервалам $\Delta t' = 1$ с, в которых изменение частоты вибрации достаточно мало. Такое деление позволяет считать, что сигнал в каждом интервале близок к статичному по частоте. В каждом интервале производится поиск модуляции $\Delta P_i(t)$. Участок считается модулированным в случае превышения заранее определенного порога. В настоящей работе зависимость порога от частоты аппроксимирована экспонентой, так как шум мощности имел низкочастотный характер.

Для детального исследования к интервалам, где вероятна модуляция сигнала, применен вейвлет-анализ [10–16], который выполнен посредством функции CWT (Continuous Wavelet Transform) пакета MATLAB

[1] [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.pnppk.com (дата обращения: 15.12.2024).

[2] [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.oemarket.com (дата обращения: 15.12.2024).

[3] [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.lightcomm.com (дата обращения: 15.12.2024).

[4] NASA-STD-7001

$$CWT_x^{\psi}(\tau, s) = \Psi_x^{\psi}(\tau, s) = \frac{1}{\sqrt{|s|}} \int x(t)\psi\left(\frac{t-\tau}{s}\right) d,$$

где τ — параллельный перенос; s — масштабный коэффициент; $\psi(t)$ — материнский вейвлет.

На основе [16] использован материнский вейвлет типа «BUMP». Применение вейвлет-анализа только к интервалам вероятной модуляции значительно снижает требования к вычислительным мощностям и время полной обработки результатов эксперимента.

Рассмотрим псевдокод алгоритма, реализующего Фурье- и вейвлет-обработки измеряемой оптической мощности при воздействии вибрации. Приняты следующие обозначения: $F_m \equiv \{F_m\}$ — множество (массив) частот, для которых имеет место модуляция оптической мощности (сначала пустое ∅); $P \equiv \{P\}$ — множество значений мощности, отсортированных по возрастанию частоты; f — частота опроса; $p_f \equiv \{p\}_{\{f\}}$ — подмножество значений мощности $p_f \in P$, соответствующих набору частот воздействия $\{f\} \in [f_t; f_{t+\Delta t'}]$ в интервале времени $t \in [t; t + \Delta t']$ при $\Delta t' = 1$ с; $\tilde{p} \equiv \{\tilde{p}\}$ — множество Фурье-образов $\{p\}_{\{f\}}$; $\tilde{p}_j \in \tilde{p}$ — элемент множества $\tilde{p}$; Π — порог модуляции.

Этап 1. Поиск частот, на которых наблюдается модуляция:

$F_m = \emptyset$	множество частотных интервалов с модуляцией;
for p_f in P	перебор по множествам мощностей, отсортированных по возрастанию частоты;
$\tilde{p} = \mathbf{FFT}(p)$	нахождение Фурье-образов;
for $\tilde{p}_j$ in $\tilde{p}$	перебор Фурье-образов;
if $\tilde{p}_j > \Pi$	проверка превышения порога;
$f \cup F_m$	включение в множество интервалов с модуляцией.

Этап 2. Вейвлет-преобразование:

for f in F_m	перебор по интервалам с модуляцией;
CWT(p_f)	вейвлет-преобразование.

Результаты и их обсуждение

Мощность излучения на выходах Y-разветвителя совпадает не в точности 50/50. Одной из характеристик качества таких компонентов является коэффициент деления:

$$k_0 = P_1/P_2,$$

где P_1 и P_2 — мощности на выходах 1 и 2 соответствующего разветвителя при отсутствии вибраций. Изменение коэффициента деления при воздействии вибраций характеризуется величиной:

$$\varepsilon_k = |1 - k_F/k_0|,$$

где k_F — значение коэффициента деления на частоте F.

Покажем применение предложенной методики оценки чувствительности к вибрации для оптических разветвителей компаний ПНППК, BitLine и LightComm, которые в процессе эксперимента опрашивались одновременно. На рис. 3 представлены необработанные экспериментальные значения оптической мощности для разветвителей. На рис. 3, *a* — изменение оптической мощности на разветвителях в течение всего испытания. Ось абсцисс представлена частотой вибрационного воздействия в соответствии с рис. 2. Видно, что в процессе испытаний оптическая мощность источника (опорный луч) испытывала колебания, однако это явление можно скомпенсировать, применив к сигналу соотношение (1). Различие в среднем уровне мощности разветвителей вызвано как различным качеством сварных соединений,

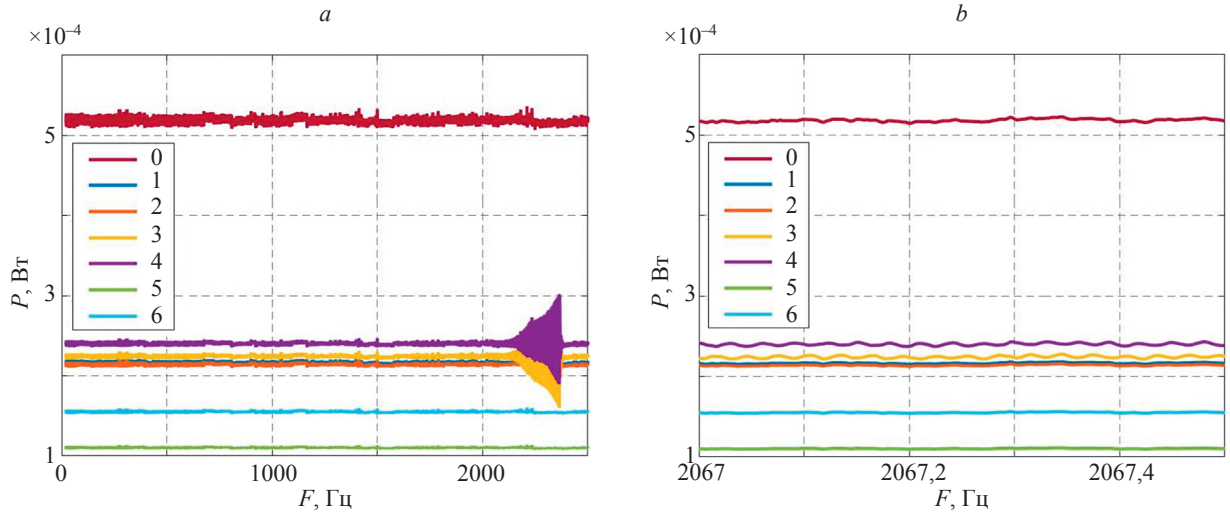


Рис. 3. Графики зависимостей прошедшей через разветвители оптической мощности P от частоты вибрационного воздействия F для различных разветвителей: весь исследуемый диапазон частот (*a*); фрагмент диапазона крупным планом (*b*). Номера зависимостей в легенде совпадают с нумерацией каналов на рис. 1: 0 — опорный сигнал; 1 и 2 — мощности на выходах разветвителя производства ПНППК; 3 и 4 — BitLine; 5 и 6 — LightComm

Fig. 3. Graph showing the dependence of the optical power (P) passed through the splitters on the vibration frequency (F) for different splitters: The whole frequency range under study (*a*); a close-up fragment of the range (*b*). The numbering of the dependencies corresponds to the channel numbering in Fig. 1: 0 — reference signal; 1 and 2 — power at the outputs of the splitter produced by PNPPK; 3 and 4 — BitLine; 5 and 6 — LightComm

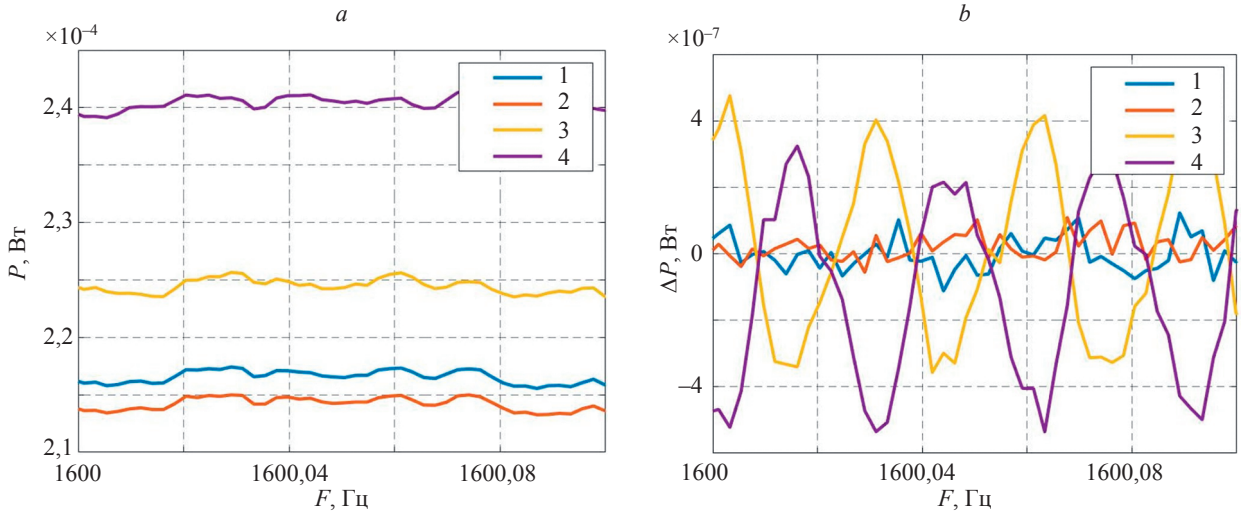


Рис. 4. Пример сигнала при вибровоздействии: без предварительной обработки (*a*); обработанные по соотношению (1) (*b*). Номера зависимостей в легенде совпадают с нумерацией каналов на рис. 1: 1 и 2 — мощности на выходах разветвителя производства ПНППК, 3 и 4 — BitLine

Fig. 4. Example of a signal under vibration action: without pre-processing (*a*); processed action according to relation (1) (*b*). The numbering of dependencies coincides with the channel numbering in Fig. 1: 1 and 2 represent the power at the outputs of the splitter produced by the PNPPK; 3 and 4 represent the BitLine

так и отличием потерь мощности, возникающих при делении. На рис. 3, *b* взят малый участок воздействия, на котором видно, что оптическая мощность на разветвителях компании BitLine модулируется с частотой воздействия. Остальные разветвители явной модуляции не испытали и отклонение их коэффициента деления ε_k не превышало 0,3 % от изначального k_0.

На рис. 4, *a* представлены необработанные данные, на рис. 4, *b* показан пример обработки сигнала с помощью соотношения (1). Эта процедура позволяет повысить различимость изменений сигнала, вызванных вибровоздействием. На рис. 4, *b* приведены результаты для разветвителей ПНППК и BitLine. На разветвителях BitLine видно изменение оптической мощности в связи с колебаниями коэффициента деления в результате вибрации.

На рис. 5 показан Фурье-образ мощности исходного сигнала в частотной области, приведенный в логарифмических единицах. Красной линией изображен порог, выше которого сигнал считается модулированным. Максимальная детектируемая частота модуляции сигнала на Y-разветвителе F_{max} определяется частотой дискретизации системы опроса $F_{опр}$ и равна ее половине, т. е. при $F_{опр}$ = 20 кГц максимальная частота детектируемых частот составляет $F_{max} = F_{опр}/2$ = 10 кГц. Из рис. 5 видно, что на частоте F = 1780 Гц сигнал модулируется, в окрестности этой частоты будет проводиться вейвлет-анализ сигнала.

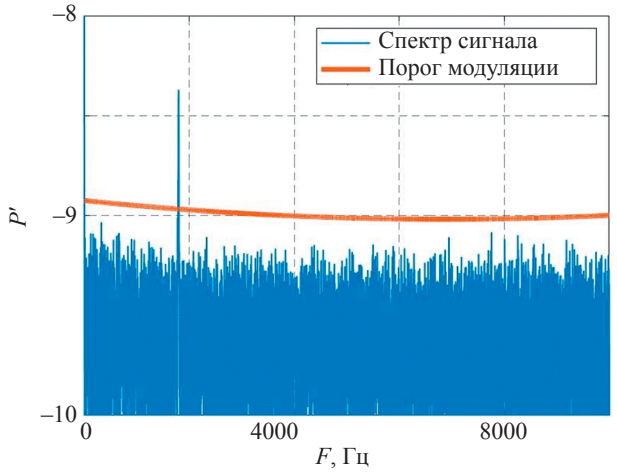


Рис. 5. Фурье-образ P' мощности исходного сигнала в частотной области F.

Величина P' приведена в логарифмических единицах

Fig. 5. Fourier image P' of the power of the original signal in the frequency domain F.

The value of P' is given in logarithmic units

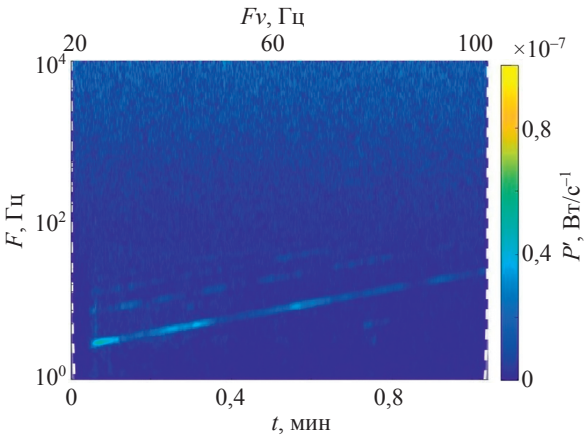


Рис. 6. Пример вейвлет картины с наблюдаемыми гармониками.
Fv — частота воздействия

Fig. 6. Example of wavelet pattern with observed harmonics.
Fv — vibration frequency

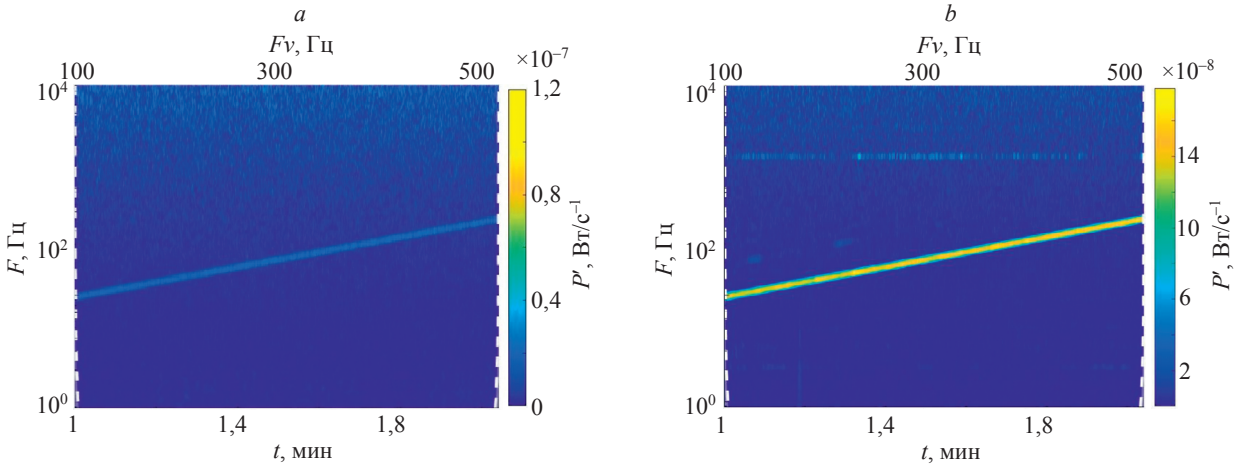


Рис. 7. Вейвлет-анализ разветвителей: LightComm (*a*) и BitLine (*b*)
Fig. 7. Wavelet analysis of optical splitters: LightComm (*a*) and BitLine (*b*)

Вейвлет-анализ позволяет выявить частоты модуляции, а также кратные им гармоники и их изменение во времени. На рис. 6 приведен пример вейвлет-анализа обработанного сигнала, на котором видно несколько полос модуляции. Угол наклона этих полос обусловлен изменением частоты со временем, их количество — количество наблюдаемых гармоник.

Анализ по предложенной методике показал стабильную слабую модуляцию на разветвителях LightComm и BitLine. Вейвлет-анализ позволил выявить резонансную частоту ($F_{рез}$ = 2,17 кГц) на разветвителях BitLine (рис. 7) при значительно более низких частотах воздействия (100–500 Гц), что говорит о перспективности метода в исследовании чувствительности компонентов в высокочастотном диапазоне. При частоте воздействия ниже 100 Гц на разветвителях ПННПК наблюдалось несколько гармоник модуляции мощности, на больших частотах модуляция не обнаружена.

В таблице обобщены результаты проведенных испытаний разветвителей. Представлены коэффициент деления без вибрации k_0, его относительное изменение ε_k, вызванное вибрацией, и максимальная амплитуда модуляции мощности $P_{мод}$.

Представленные результаты показывают, что воздействие вибрации на компоненты может приводить к значительным изменениям их характеристик. При этом изменение коэффициента деления периодично и повторяет внешнее воздействие. Стандартным допуском для Y-разветвителей 50/50 считается отклонение коэффициента деления на 2 % при нормальных климатических условиях (температура 15–35 °С, относительная влажность воздуха 45–80 %, атмосферное давление 84,0–106,7 кПа)[1]. Как видно из полученных данных, все разветвители удовлетворяли этому требованию, однако

Таблица. Изменение параметров разветвителей, вызванное вибрацией

Table. Variation of splitter parameters caused by vibration

Производитель	k_0, %	ε_k, %	$P_{мод}$, нВт
LightComm	50,2/49,8	0,1	250
BitLine	48,3/51,7	1,3 (24*)	50 000
ПННПК	48,4/51,6	менее 0,1 (0,3**)	400

Примечание. * — отклонение на резонансной частоте 2,17 кГц; ** — на частотах до 100 Гц.

при воздействии вибрации образец BitLine вышел за данную границу на резонансной частоте.

Заключение

В работе представлена методика количественного определения чувствительности оптических компонентов к вибрации. Предложен экспериментальный стенд, позволяющий реализовывать вибрационное воздействие различной частоты на оптические компоненты, а также количественно определять величину модуляции проходящего оптического излучения в зависимости от частоты воздействия. Разработан алгоритм постобработки и анализа данных, основанный на Фурье- и вейвлет-преобразованиях.

С помощью разработанного программного комплекса протестированы разветвители различных производителей. Определено влияние частоты вибрации на коэффициент деления и амплитуду модуляции оптической мощности. Предложенный метод позволяет наблюдать модуляцию мощности менее 0,1 % от мощности исходного сигнала и определять резонансную частоту исследуемого объекта при частоте вибровоздействия ниже резонансной. Применение разработанного алгоритма обеспечивает наглядное исследование модуляции, вызванной внешними факторами, не только механическими, но и потенциально термическими.

Таким образом, продемонстрированный комплекс и методика применимы для определения вибрационной

[1] ГОСТ 15150–69. Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды. Введен 01.01.1971. М.: Стандартинформ, 2010. 85 с.

чувствительности не только пассивных оптических компонентов типа разветвителей, но и для активных источников излучения, и позволит подбирать более качественные детали, тем самым улучшив парметры волоконных гироскопов.

Литература

1. Hati A., Nelson C.W., Taylor J., Ashby N., Howe D.A. Cancellation of vibration-induced phase noise in optical fibers // IEEE Photonics Technology Letters. 2008. V. 20. N 22. P. 1842–1844. https://doi.org/10.1109/lpt.2008.2004697
2. 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
3. Li R.-J., Lei Y.-J., Chang Z.-X., Zhang L.-S., Fan K.-C. Development of a high-sensitivity optical accelerometer for low-frequency vibration measurement // Sensors. 2018. V. 18. N 9. P. 2910. https://doi.org/10.3390/s18092910
4. Aleksandr A. Vlasov, Mikhail Yu. Plotnikov Artem N. Ashirov, Artem S. Aleynik. The method for protection of sensitive fiber optic components from environmental noise and vibration impacts // Proc. of the IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech). 2019. P. 305–307. https://doi.org/10.1109/EExPolytech.2019.8906889
5. Song N., Zhang C., Du X. Analysis of vibration error in fiber optic gyroscope // Proceedings of SPIE. 2002. V. 4920. P. 115–121. https://doi.org/10.1117/12.481959
6. Zhang Y., Gao G. Fiber optic gyroscope vibration error due to fiber tail length asymmetry based on elastic-optic effect // Optical Engineering. 2012. V. 51. N 12. P. 124403. https://doi.org/10.1117/1.OE.51.12.124403
7. Li H., Cui L., Lin Z., Zhang C. Analysis and optimization of dynamic measurement precision of fiber optic gyroscope // Mathematical Problems in Engineering. 2013. V. 2013. P. 265895. https://doi.org/10.1155/2013/265895
8. Osunluk B. Enviromental effects on interferometric fiber optic gyroscope performance. Dissertation for the degree of PhD in electrical and electronics engineering. Bilkent University, 2021. 110 p.
9. Frigo M., Johnson S.G. FFTW: An adaptive software architecture for the FFT. // Proc. of the IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. 1998. V. 3. P. 1381–1384. https://doi.org/10.1109/icassp.1998.681704
10. Зименко К.А., Боргуль А.С., Маргун А.А. Анализ и обработка сигналов электромиограммы // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2013. Т. 13. № 1. С. 41–43.
11. Козинов И.А. Обнаружение локальных свойств анализируемых сигналов и процессов с использованием вейвлет-преобразования // Информационно-управляющие системы. 2015. № 1 (74). С. 21–28. https://doi.org/10.15217/issn1684-8853.2015.1.21
12. Mahamune R., Laskar S.H. Classification of the four-class motor imagery signals using continuous wavelet transform filter bank-based two-dimensional images // International Journal of Imaging Systems and Technology. 2021. V. 31. N 4. P. 2237–2248. https://doi.org/10.1002/ima.22593
13. Lilly J.M., Olhede S.C. Generalized Morse wavelets as a superfamily of analytic wavelets // IEEE Transactions on Signal Processing. 2012. V. 60. N 11. P. 6036–6041. https://doi.org/10.1109/TSP.2012.2210890
14. Lilly J.M., Olhede S.C. Higher-order properties of analytic wavelets // IEEE Transactions on Signal Processing. 2009. V. 57. N 1. P. 146–160. https://doi.org/10.1109/TSP.2008.2007607
15. Lilly J.M. Element analysis: a wavelet-based method for analysing time-localized events in noisy time series // Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 2017. V. 473. N 2200. P. 20160776. https://doi.org/10.1098/rspa.2016.0776
16. Qin Z., Chen L., Bao X. Continuous wavelet transform for non-stationary vibration detection with phase-OTDR // Optics Express. 2012. V. 20. N 18. P. 20459–20465. https://doi.org/10.1364/OE.20.020459

References

1. Hati A., Nelson C.W., Taylor J., Ashby N., Howe D.A. Cancellation of vibration-induced phase noise in optical fibers. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2008, vol. 20, no. 22, pp. 1842–1844. https://doi.org/10.1109/lpt.2008.2004697
2. 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
3. Li R.-J., Lei Y.-J., Chang Z.-X., Zhang L.-S., Fan K.-C. Development of a high-sensitivity optical accelerometer for low-frequency vibration measurement. *Sensors*, 2018, vol. 18, no. 9, pp. 2910. https://doi.org/10.3390/s18092910
4. Aleksandr A. Vlasov, Mikhail Yu. Plotnikov Artem N. Ashirov, Artem S. Aleynik. The method for protection of sensitive fiber optic components from environmental noise and vibration impacts. *Proc. of the IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech)*, 2019, pp. 305–307. https://doi.org/10.1109/EExPolytech.2019.8906889
5. Song N., Zhang C., Du X. Analysis of vibration error in fiber optic gyroscope. *Proceedings of SPIE*, 2002, vol. 4920, pp. 115–121. https://doi.org/10.1117/12.481959
6. Zhang Y., Gao G. Fiber optic gyroscope vibration error due to fiber tail length asymmetry based on elastic-optic effect. *Optical Engineering*, 2012, vol. 51, no. 12, pp. 124403. https://doi.org/10.1117/1.OE.51.12.124403
7. Li H., Cui L., Lin Z., Zhang C. Analysis and optimization of dynamic measurement precision of fiber optic gyroscope. *Mathematical Problems in Engineering*, 2013, vol. 2013, pp. 265895. https://doi.org/10.1155/2013/265895
8. Osunluk B. *Enviromental effects on interferometric fiber optic gyroscope performance*. Dissertation for the degree of PhD in electrical and electronics engineering. Bilkent University, 2021, 110 p.
9. Frigo M., Johnson S.G. FFTW: An adaptive software architecture for the FFT. *Proc. of the IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, 1998, vol. 3, pp. 1381–1384. https://doi.org/10.1109/icassp.1998.681704
10. Zimenko K.A., Borgul A.S., Margun A.A. Analysis and processing of electromyogram signals. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2013. vol. 13, no 1, pp. 41–43. (in Russian)
11. Kozinov I.A. Detecting local characteristic of analyzed signals and processes using wavelet transformation. *Information and Control Systems*, 2015, no. 1 (74), pp. 21–28. (in Russian). https://doi.org/10.15217/issn1684-8853.2015.1.21
12. Mahamune R., Laskar S.H. Classification of the four-class motor imagery signals using continuous wavelet transform filter bank-based two-dimensional images. *International Journal of Imaging Systems and Technology*, 2021, vol. 31, no. 4, pp. 2237–2248. https://doi.org/10.1002/ima.22593
13. Lilly J.M., Olhede S.C. Generalized Morse wavelets as a superfamily of analytic wavelets. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2012, vol. 60, no. 11, pp. 6036–6041. https://doi.org/10.1109/TSP.2012.2210890
14. Lilly J.M., Olhede S.C. Higher-order properties of analytic wavelets. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2009, vol. 57, no. 1, pp. 146–160. https://doi.org/10.1109/TSP.2008.2007607
15. Lilly J.M. Element analysis: a wavelet-based method for analysing time-localized events in noisy time series. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2017, vol. 473, no. 2200, pp. 20160776. https://doi.org/10.1098/rspa.2016.0776
16. Qin Z., Chen L., Bao X. Continuous wavelet transform for non-stationary vibration detection with phase-OTDR. *Optics Express*, 2012, vol. 20, no. 18, pp. 20459–20465. https://doi.org/10.1364/OE.20.020459

Авторы

Смертин Роман Михайлович — инженер-исследователь, Пермская научно-производственная приборостроительная компания, Пермь, 614990, Российская Федерация; студент, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, 614990, Российская Федерация, https://orcid.org/0009-0002-7329-9413, romsmerm@gmail.com

Никулин Илларион Леонидович — доктор технических наук, профессор, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, 614990, Российская Федерация, SC 55654671400, https://orcid.org/0000-0002-8496-7942, nil@pstu.ru

Authors

Roman M. Smertin — Engineer-Reseacher, Perm Scientific-Industrial Instrument Making Company (PAO PNPPK), Perm, 614990, Russian Federation; Student, Perm National Research Polytechnic University, Perm, 614990, Russian Federation, https://orcid.org/0009-0002-7329-9413, romsmerm@gmail.com

Illarion L. Nikulin — D.Sc., Professor, Perm National Research Polytechnic University, Perm, 614990, Russian Federation, SC 55654671400, https://orcid.org/0000-0002-8496-7942, nil@pstu.ru

Статья поступила в редакцию 25.01.2025
Одобрена после рецензирования 21.06.2025
Принята к печати 22.07.2025

Received 25.01.2025
Approved after reviewing 21.06.2025
Accepted 22.07.2025

Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ
июль–август 2025 Том 25 № 4 http://ntv.ifmo.ru/
SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL OF INFORMATION TECHNOLOGIES, MECHANICS AND OPTICS
Jule–August 2025 Vol. 25 No 4 http://ntv.ifmo.ru/en/
ISSN 2226-1494 (print) ISSN 2500-0373 (online)

doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-4-617-625

Characterization of Ar:N_2 plasma mixture with optical emission spectroscopy during deposition of NbN coating

Harakat Mohsin Roomy[1]✉, Mohammed K. Khalaf[2], Mohammed G. Hammed[3]

[1] Ministry of Education, Baghdad, 10011, Iraq
[2] Ministry of Science and Technology, Baghdad, 10011, Iraq
[3] University of Anbar, Ramadi, 31011, Iraq

[1] hrkatm37@gmail.com✉, https://orcid.org/0000-0002-7919-4463
[2] mohammed.k.khalaf@src.edu.iq, https://orcid.org/0000-0001-5688-6304
[3] Sc.moh72_gh@uoanbar.edu.iq, https://orcid.org/0000-0002-0226-702X

Abstract

The combination of optical emission spectroscopy with models of plasma light emission represents a non-intrusive and adaptable approach for determining plasma characteristics. This study aimed to investigate the plasma electron temperature, electron density, and other parameters of plasma within context DC magnetron sputtering, under a various experimental condition, in the existence of a Niobium target and an Argon:Nitrogen gas mixture. To evaluate electron temperature and electron density, optical emission spectroscopy was employed at a range of discharge voltages (400–800 V) and gas pressures (0.04–3.3 mbar). The measurements were taken during the deposition of a Niobium nitride coating with in magnetron sputtering setup, maintaining a gap distance of 0.06 m and a total flow rate of 40 Standard Cubic Centimeters per Minute. The temperature of electron was assessed using Boltzmann plot strategy with several ion lines Ar^+ lines, while density of electron was determined from the intensity ratio of atomic to ionic lines using Saha-Boltzmann equation. The results demonstrate that, for the plasma under investigation, an increase in the applied voltage lead to an elevation of temperature of electron, while an increase in the working pressure results in a reduction in the temperature of electron. Conversely, the density of electron decreases with the increasing applied voltage and increases with rising working pressure. Additionally, the findings indicate that the introduction of a modest quantity of nitrogen gas into the discharge source resulted in improved electrical characterization of the glowing discharge plasma during the Niobium nitride coating deposition process.

Keywords

optical emission spectroscopy, parameters of plasma, glow discharges, electron temperature, electron density

Acknowledgements

Our thanks and appreciation to the laboratories of the University of Baghdad and the Ministry of Science and Technology for completing the requirements of this study.

For citation: Roomy H.M., Khalaf M.K., Hammed M.G. Characterization of Ar:N_2 plasma mixture with optical emission spectroscopy during deposition of NbN coating. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2025, vol. 25, no. 4, pp. 617–625. doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-4-617-625

УДК 621.793.16

Характеризация плазменной смеси Ar:N_2 с помощью оптической эмиссионной спектроскопии при магнетронном осаждении покрытия NbN

Харакат Мохсин Руми[1]✉, Мохаммед К. Халаф[2], Мохаммед Г. Хаммед[3]

[1] Министерство образования, Багдад, 10011, Ирак
[2] Министерство науки и технологий, 10011, Ирак
[3] Университет Анбар, Анбар, 31011, Ирак

[1] hrkatm37@gmail.com✉, https://orcid.org/0000-0002-7919-4463
[2] mohammed.k.khalaf@src.edu.iq, https://orcid.org/0000-0001-5688-6304
[3] Sc.moh72_gh@uoanbar.edu.iq, https://orcid.org/0000-0002-0226-702X

© Roomy H.M., Khalaf M.K., Hammed M.G., 2025

Аннотация
Сочетание оптической эмиссионной спектроскопии с моделированием плазменного светового излучения представляет собой неинтрузивный и адаптируемый подход к определению характеристик плазмы. Целью данного исследования было изучение температуры электронов плазмы, электронной плотности и других параметров плазмы при магнетронном распылении на постоянном токе в различных экспериментальных условиях в присутствии ниобиевой мишени и газовой смеси аргон-азот (Ar:N_2). Для оценки температуры и электронной плотности использовалась оптическая эмиссионная спектроскопия в диапазоне напряжений разряда 400–800 В и давлений газа 0,04–3,3 мбар. Измерения проводились во время осаждения покрытия из нитрида ниобия (NbN) методом магнетронного распыления при поддержке расстояния между зазорами 0,06 м и общей скорости потока 40 стандартных кубических сантиметров в минуту. Температура электронов оценивалась путем построения графика Больцмана с несколькими ионными линиями Ar^+, а плотность электронов определялась из отношения интенсивностей атомных и ионных линий с использованием уравнения Саха–Больцмана. Результаты исследований показали, что увеличение приложенного напряжения приводит к повышению температуры электронов, в то время как увеличение рабочего давления приводит к снижению температуры электронов. Наоборот, плотность электронов уменьшается с увеличением приложенного напряжения и увеличивается с ростом рабочего давления. Показано, что введение небольшого количества N_2 в источник разряда во время процесса осаждения NbN приводит к улучшению электрических характеристик плазмы тлеющего разряда.

Ключевые слова
оптическая эмиссионная спектроскопия, параметры плазмы, тлеющие разряды, электронная температура, электронная плотность

Благодарности
Авторы выражают благодарность и признательность лабораториям Багдадского университета и Министерству науки и технологий Республики Ирак за выполнение требований данного исследования.

Ссылка для цитирования: Руми Х.М., Халаф М.К., Хаммед М.Г. Характеризация плазменной смеси Ar:N_2 с помощью оптической эмиссионной спектроскопии при магнетронном осаждении покрытия NbN // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2025. Т. 25, № 4. С. 617–625 (на англ. яз.). doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-4-617-625

Introduction

Low-temperature plasmas are systems that are significantly out of equilibrium, producing distinctive physical and chemical conditions by means of free electrons in low-temperature gas. The unique environment allows for the precise treatment of temperature-sensitive materials with atomic and molecular accuracy. Plasma technologies are a valuable resource for numerous high-end industries [1–3]. Electron temperature (T_e) is typically used to describe plasma because electrons, being much smaller and lighter than ions, achieve thermal equilibrium more quickly. This means their energy distribution stabilizes faster than that of the much heavier ions [2]. T_e determines many properties of the plasma, including electrical conductivity, light emission, and how it interacts with magnetic and electric fields. This makes it a vital parameter in various applications, from industrial plasma processes to astrophysical studies [4]. The nitrogen molecules (N_2) presented in Argon:Nitrogen (Ar:N_2) admixture plasma undergo a series of atomic transformations resulting in the formation of various atomic nitrogen species. These species possess a range of industrial applications, including thin layer deposition, surface chemistry, nitride thin layers, material modification, etching, surface sterilization, and the alteration of the surface properties of different materials [5–7]. Spectral diagnostics of glow discharge plasma involve detailed analyses of the radiation it emits or absorbs. By examining emission strength, absorption features, and the broadening or shifting of spectral lines, scientists can deduce critical plasma properties. These methods enable precise control and understanding of plasma behavior, supporting advancements in research and industrial applications [8]. The Optical Emission Spectroscopy (OES) is utilized to monitor the plasma and assurance that has arrived at consistent state rapidly after start. The evolution of a line emission over time is used to determine plasma stability [9, 10]. Contingent upon the gas creation and plasma properties, all plasma produces radiation. It is mostly known that when a molecular gas is added to a rare gas, the discharge characteristics can change dramatically, affecting the type and intensity of radiation produced [11]. The magnitude besides the pattern of these changes is influenced by the conditions of discharge: the type of rare gas, the type besides the degree of mixing, and the gas pressure, etc. The Ar:N_2 is considered to be one of the most commonly used mixtures in discharge investigations as a gas mixture [12]. Because of its potential for technological applications, for decades, scientists have examined low pressure plasma in N_2 glow discharges. The active species generated in these processes are crucial for a variety of applications, including plasma-assisted ignition, biological sterilization and heating, combustion, surface treatment, and the destruction of hazardous chemicals and pollutants [11, 13]. In the context of plasma physics, low-pressure discharge operating conditions are frequently delineated in terms of T_e and electron density (n_e). These parameters are of paramount importance for comprehending the behavior and properties of the plasma. OES is a widely utilized non-meddlesome diagnostic tool for analyzing plasmas [14]. The method operates by detecting the light emitted from excited atoms and molecules as they return to lower energy states. The intensity and wavelengths of this emitted light provide essential data to model and optimize plasma processes by offering insights into each T_e and n_e which are fundamental in determining the energy distribution and behavior of the plasma [15]. By exposing a sample to Ar:N_2 plasma, it is possible to achieve

a balance between nitriding and sputtering processes, thereby forming a controlled and effective nitride layer. An understanding of, and ability to manipulate, ion flux and plasma parameters is essential for the tailoring of surface properties to meet specific application requirements [16]. The barraging particle sort and active energy, as well as the sort and surface state of the substance to be utilized, are exceedingly significant components in deciding the sputtering rate [17]. A spectroscopic strategy can gauge the electron temperature in various ways; Boltzmann's plot is the best regularly involved spectroscopic demonstrative methodology for deciding the T_e in the research center plasma [18], which ensures greater precision by assuming Boltzmann distribution for the population of emitting levels. The intensities of numerous spectral lines with varied threshold excitation energies are used to determine the T_e in this method [19]. The T_e and n_e represent the most fundamental characteristics of plasmas, exerting a significant influence on the operational and maintenance dynamics of gas discharges. The experimental results of a parametric investigation of atmospheric plasma characteristics are presented in this work. The atomic emission line intensities were employed to calculate plasma characteristics, including temperature, intensity of electron, and other plasma parameters in the presence of a Niobium target (Nb) and an Ar:N_2 gas mixture. The study employed the OES method, whereby the discharge conditions were varied. These included the applied voltage and operational pressure in an Ar:N_2 plasma which was generated using a Nb target and its deposited Niobium nitride (NbN) coating.

Theoretical approach

Numerous spectroscopic methods can be used to calculate the T_e, but Boltzmann's plot is the most widely used approach in laboratory plasmas due to its higher accuracy. This methodology defines the T_e by using the intensities of several spectral lines with different threshold excitation energies.

This can be accomplished by making the assumption that the population of emitting levels is distributed according to Boltzmann's law. The T_e is gained from the slope of the Boltzmann's plot utilizing several of argon ion (Ar^+) spectral lines that share a common lower level. This relationship enables the Boltzmann plot method to evaluate the T_e [20, 21]:

$$\ln\left(\frac{\lambda I}{Ag_u}\right) = -\frac{E_u}{K_B T_e} + C,$$

where I is the relative intensity of the emitted line; λ is the wavelength; the upper-level statistical weight, signified by the symbol g_u, can be intended using the total angular momentum quantum number (J), according to the association ($g = 2J + 1$); A represents the transition probability which quantifies the probability that an atom in an upper level state will randomly emit a photon and subsequently de-excite to a lower level state with a frequency of once every second; K_B is the Boltzmann constant ($1.38 \cdot 10^{-23}$ J/K); T_e is the temperature of electron in K; E_u is defined as energy originating from a higher level of existence; C is a constant; and $\left(\frac{\lambda I}{Ag_u}\right)$ is the relative intensity of the emitted line. The verse energies of the higher level of E_u are linearly related and characterized by a slope of $(1/T_e)$. The n_e can be computed using the Saha-Boltzmann equation, which is written as follows, from the emission of singly charged ion (ionic) and neutral particle (atomic) spectral lines in the plasma [22]:

$$n_e = 6.04 \cdot 10^{21} (T_e)^{3/2} \frac{I^a \lambda^a g^i A^i}{I^i \lambda^i g^a A^a} \exp \frac{E^a - E_{ion} - E^i}{K_B T_e},$$

where the higher indices (a) and (i) for parameters stand for the neutral particle and singly charged ion, respectively; the ionization energy of the neutral particle is well-established and is denoted by the symbol E_{ion}. The atomic spectral database of the National Institute of Standards and Technology (NIST) contains the values of E_u, A, E_{ion}, and g_u. Debye shielding ensures that plasmas maintain their quasi-neutrality by limiting the spatial extent of electric fields through the rearrangement of charges. The Debye length (λ_D) provides a measure of the characteristic scale over which this shielding occurs. The mathematical expression for the λ_D is [23]:

$$\lambda_D = \sqrt{\frac{\varepsilon_\circ K_B T_e}{e^2 n_e}},$$

where e is the electron charge; $\varepsilon_\circ$ is the electric constant density. The plasma parameter (N_D) quantifies the total amount of particles contained within the Debye sphere. The shielding effect is only possible if there are enough electrons in the Debye sphere. Given the exponential decay of the potential, it can be posited that the shielding is attributable to the electrons within the Debye sphere the quantity of which is denoted by:

$$N_D = \frac{4\pi}{3} n_e \lambda_D^3.$$

The typical time scale and response of a plasma to external fields are determined by the plasma frequency. When plasma particles are moved from their equilibrium positions, a space charge field is created to restore the plasma neutrality by pulling the particles back to their original positions. These oscillations occur at a frequency known as the plasma frequency of the electron (W_{pe}) which can be expressed as [24]:

$$W_{pe} = \left(\frac{e^2 n_e}{\varepsilon_\circ m}\right)^{1/2},$$

where m is the mass of electron.

Experimental Details

Plasma system

Fig. 1 shows a picture of the principle experimental part used in this search. The an-homemade Magnetron Sputtering Plasmas procedure is usually used for materials processing which has been manufactured and based on the

following principles components. One of these work tools in the plasma chamber: cylindrical vacuum chamber from stainless steel by diameter and length of 30 cm and 40 cm, respectively. The chamber consists of two electrodes, there may be a glow discharge between these electrodes, one of the electrodes is movable and the second one is fixed electrode (denoted as cathode (magnetron)). To prevent power dissipation, the magnetron was cooled by water circulation. Additionally, the chamber was equipped with a single side window and four feedthroughs for vacuum. These included feedthroughs are: high voltage, electrical, cathode cooling, and gas supply. The vacuum system consisted of a rotary pump and a dry scroll pump. The range of this setup resulted in a vacuum of $1.33 \cdot 10^{-6}$ mbar. The plasma system consists of two distinct components: the first of which is the gas supply system, including Ar, N_2, and a pressure control system that serves to stabilize the pressures of the plasma within the chamber at a predefined value. The flow pressure of the gas mixture delivered to the plasma chamber was regulated by flow meters and a needle valve. To discharge foundation gases, the chamber was evacuated to around $1 \cdot 10^{-5}$ mbar. The cathode confronted the anode with 0.06 m spacing, anode circle (glass substrates) and cathode (Nb target). A high-purity (99.9 %) Nb target was employed as a disc with a diameter of 5 cm and a thickness of 3 mm. The operational gas Ar:N_2 gaseous mixture is considered, and the N_2 contribution in the Ar:N_2 mixture is (20, 30, 50 %), but the total flow rate was kept at 40 Standard Cubic Centimeters per Minute. The emission spectra at (200–900 nm) are recorded. An applied voltage was utilized running between 400 to 800 V and working pressure of Ar:N_2 going between $4 \cdot 10^{-2}$ and $3.3 \cdot 10^{-1}$ mbar. Plasma induced OES is conducted via a computer-controlled system comprising a spectrophotometer and an optical cable linked to a collecting optical lens. This lens is positioned towards the quartz window chamber. A spectrometer with a spectral resolution Full Width at Half Maximum (FWHM) of 2.5 nm is employed to collect radiation generated by the plasma. The spectrometer is a Surwit technology device V2100 which is capable of measuring ultraviolet and near-infrared radiation.

Results and Discussion

Six different spectral lines (750.3869, 751.4652, 763.5106, 772.3761, 811.5311, and 842.4648 nm) are selected to measure the plasma properties of argon plasma. The essential data of Ar^+ spectral lines (λ, A, E_u, and g) are presented in Table 1 which can be gained from NIST 2014, while the relative intensity taken from OES.

Fig. 2, *a* displays the contrasts of the net discharges of the different outflow lines emanating from the Ar:N_2(70:30) combination gas plasma species as a function of operating

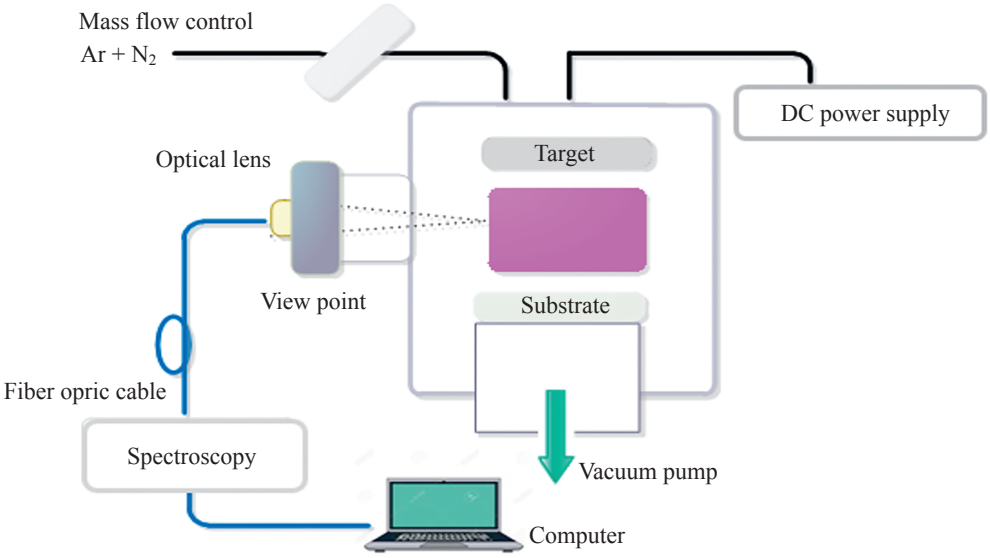


Fig. 1. Schematic diagram of the experimental system

Table 1. Spectroscopic data (λ, E, A, and g) besides fitting parameters corresponding to the selected Ar lines emitted by the Ar:N_2-rich plasma employed in this study

Ion	Wavelength λ, nm	Upper energy level E, eV	Transition probability $A \times 10^7$ s^{-1}	Statistical weight g
Ar^+	750.3869	13.47988670	4.45	1
Ar^+	751.4652	13.27303799	4.02	1
Ar^+	763.5106	13.17177759	2.45	5
Ar^+	772.3761	13.15314370	0.51	3
Ar^+	811.5311	13.07571560	3.31	7
Ar^+	842.4648	13.09487245	2.15	5

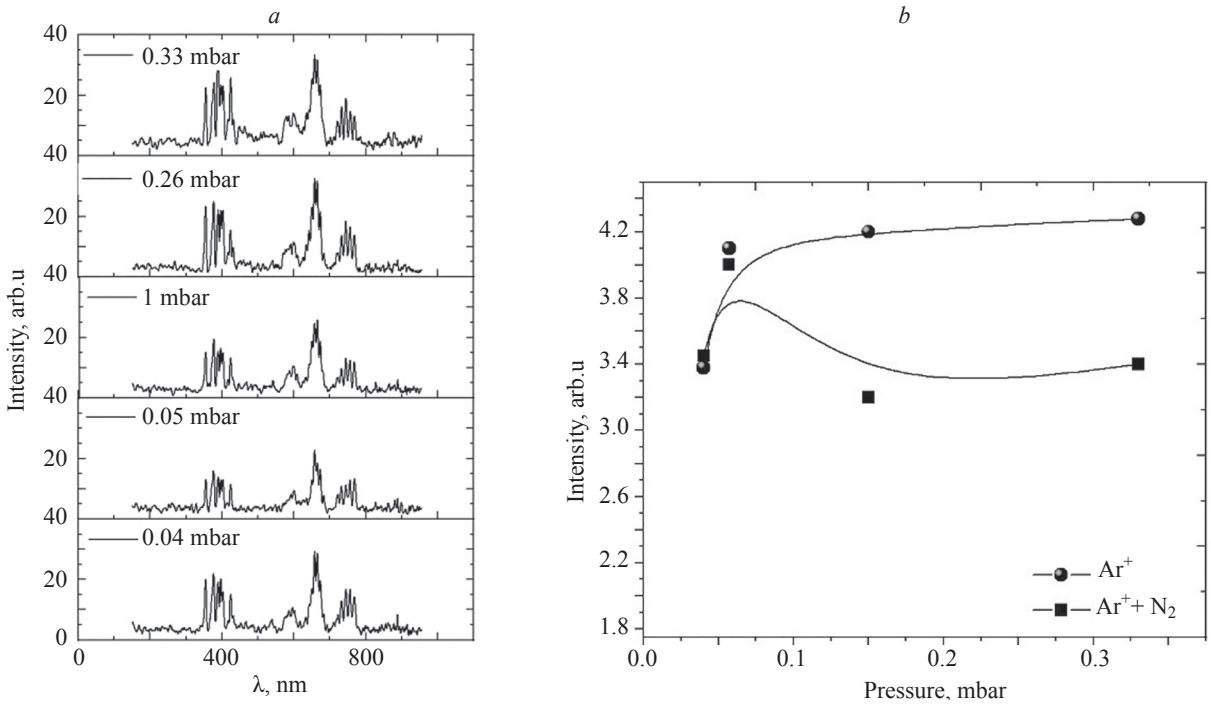


Fig. 2. Emission spectrum in Ar:N_2 mixture gas (*a*). Intensity of Ar^+ and Ar + N_2 as a function of the pressure (*b*)

pressure. When using pure argon as the plasma gas, the powers of the Ar^+ lines increase as the working pressure increases. However, when compared to the mixed Ar:N_2 plasma, there is a notable contrast. The Ar^+ and nitrogen spectral lines in the Ar:N_2 combination show weaker intensities than those observed in the pure argon plasma as shown Fig. 2, *b*. This reduced intensity in the mixed plasma suggests that the presence of nitrogen affects the overall energy distribution and excitation dynamics within the plasma. Nitrogen likely alters the excitation balance, either through quenching effects or through energy transfer processes that divert energy away from Ar emissions. This could be attributed to the complex interplay between argon and nitrogen species, influencing the energy states and radiative transitions in the plasma. As a sample exposed to an Ar:N_2 plasma interacts with active nitrogen species, it is likely to become rapidly coated with nitride layers. These surface layers can further modify the surface chemistry and sputtering dynamics, forming a barrier that affects further sputtering and alters the emission characteristics observed in the plasma. This behavior contributes to the striking contrast between the sputtering rates and resulting plasma emission characteristics of pure Ar and mixed Ar:N_2 environments.

Fig. 3, *a* depicts the comparative analysis of net discharge emissions from diverse output lines emanating from the Ar:N_2 (70:30) combination gas plasma, as a function of applied voltage. The figure elucidates the influence of voltage alterations on the emission intensity and characteristics of plasma species. As the applied voltage increases, the energy supplied to the plasma enhances the excitation and ionization processes. In the context of pure argon plasma, this results in a marked increase in the emission intensities of Ar^+ spectral lines as displayed in Fig. 3, *b*. The increase in energy leads to more frequent collisions between electrons and argon atoms, promoting higher excitation states and stronger photon emissions. In the Ar:N_2 mixture, however, the behavior shows distinctive features compared to pure argon. The presence of nitrogen introduces competing processes that can alter the energy distribution among the species. While the Ar^+ emission lines in the combination gas may still increase with applied voltage, their growth rate is typically less pronounced compared to pure argon. This is because the excitation and ionization processes are shared between argon and nitrogen. Nitrogen ability to ionize more readily and form active species such as (ionized nitrogen molecules) and other nitrogen radicals results in a redistribution of energy, which can suppress the peak intensities of Ar emissions as the applied voltage is increased.

X-Ray Diffraction Analysis

As illustrated in Fig. 4, the X-Ray Diffraction (XRD) patterns of NbN thin layers deposited at varying N_2 ratios (20 %, 30 %, and 50 %) in Ar:N_2 gas mixtures were examined. It was observed that the peak intensity (200) at $2\theta = 23.15°$ for the NbN nanoparticles coating deposited at 30 % was higher than that of the coating deposited at 20 % and 50 %. This diffraction angle corresponds to twice the angle (θ) between the incident X-ray beam and the diffracting crystal planes, and expressed in degrees. This finding indicates that the structure of NbN thin layers has a cubic construction, which is in excellent agreement with the International Centre for Diffraction Data card no. 75-0592. The absence of additional peaks detected indicates that the high-purity phase was synthesized in the absence of impurities. As the Ar:N_2 ratio changes from 80:20 to 70:30, the XRD analysis shows a noticeable rise in FWHM from 0.2500° to 0.5500°. A notable decrease in crystallite size from 32.4 nm to 14.8 nm is linked to this widening. The higher nitrogen content probably causes more lattice strain

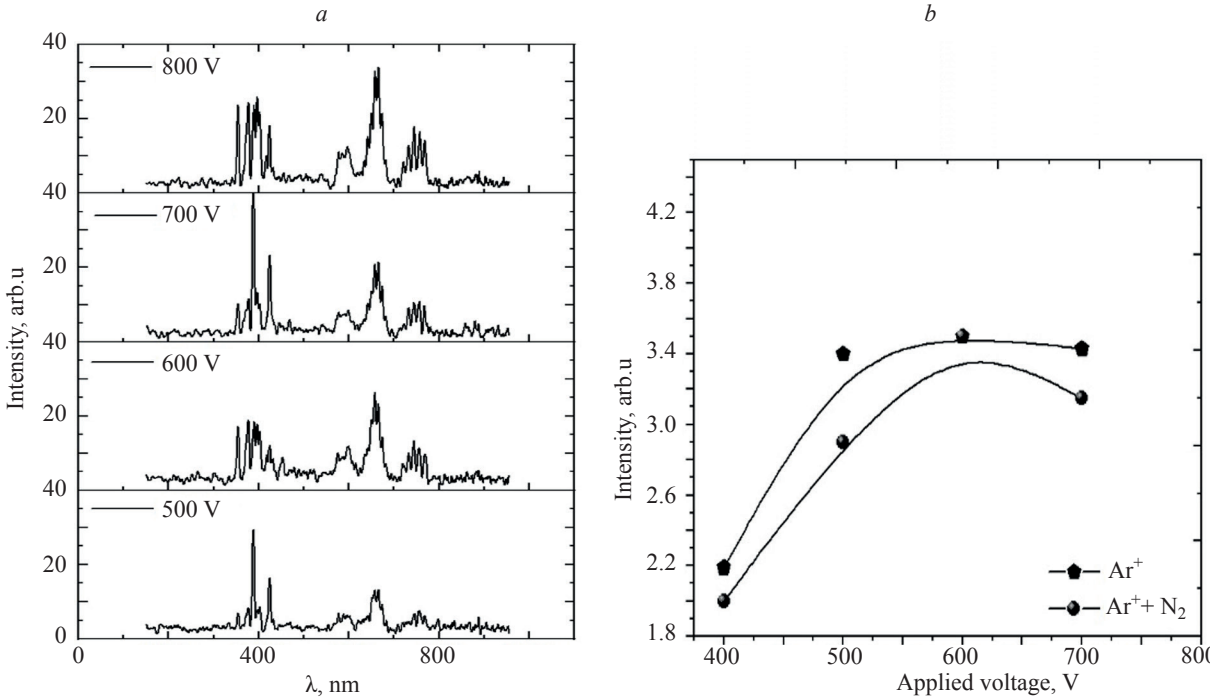


Fig. 3. Emission spectrum in Ar:N_2 mixture gas (*a*). Intensity of Ar^+ and $Ar^+ + N_2$ as a function of applied voltage (*b*)

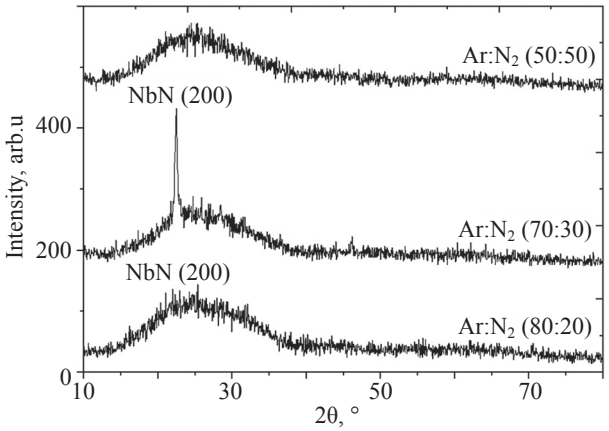


Fig. 4. XRD patterns for the NbN coating at different gas ratio

and disorder, which hinders the formation of crystallites and lowers the structural quality. The Miller indices (h, k, l) used to indicate the orientation of crystallographic planes in a crystal lattice, are denoted by the notation (hkl) in Table 2. The plane labeled (200) represents a set of planes that intercept the crystallographic axes in a specific. The results of XRD analysis are summarized in Table 2.

Plasma parameter evaluation

This relationship between T_e and pressure is critical for optimizing deposition parameters to achieve the desired NbN thin film characteristics, such as thickness, structure, and electrical or superconducting properties. Fig. 5 depicts the variation in T_e with varying working pressures, spanning a range from 0.04 to 0.33 mbar, while maintaining a constant discharge voltage of 600 V. It was observed that the T_e decreases as the working pressure rises. This phenomenon may be attributed to the fact that as the working pressure increases, the density of neutral gas atoms (e.g., nitrogen or argon in the case of NbN deposition) rises. Consequently, electrons in the plasma encounter more frequent collisions with these gas atoms, resulting in a higher collision rate. This increased collision rate leads to electrons losing energy more rapidly, which in turn results in a decrease in electron temperature. In other words, the average energy of electrons in the plasma decreases. Lower T_e at higher pressures can result in a reduction of the deposition rate due to the fact that fewer energetic electrons are available for the ionization of the sputtering gas or precursor materials. Furthermore, this phenomenon can also influence the energy and density of the ionized species arriving at the substrate, which in turn affects the quality and properties of the deposited film, including adhesion and density. In contrast the increase in plasma density with rising working pressure during the deposition of NbN thin layers (as illustrated in Fig. 5), can be attributed to a number of factors pertaining to the behavior of the plasma under conditions of elevated pressure. At higher pressures,

Table 2. A comparison of the experimental (exp.) and standard (std.) values of interplanar spacing (d_{hkl}) for NbN peaks, based on varying Ar:N_2 gas ratios, obtained from XRD data

Ar:N_2 ratios	Phase	2θ, °	FWHM, °	d_{hkl} exp., nm	Grain size, nm	d_{hkl} std. nm	hkl	Crystalline system
80:20	NbN	22.9	0.25	0.38804	32.4	0.380	(200)	cubic
70:30	NbN	23.15	0.55	0.37986	14.8	0.342	(200)	cubic

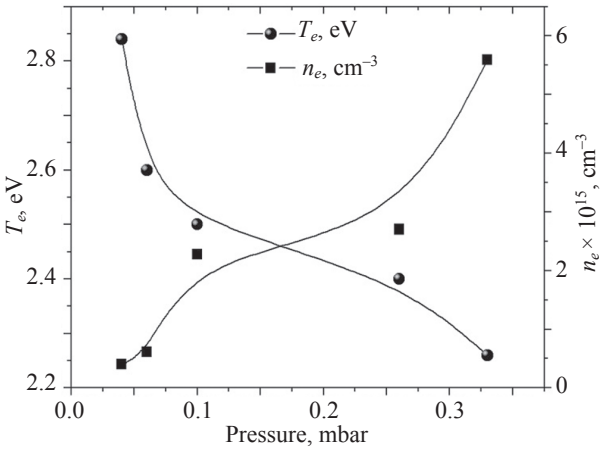


Fig. 5. Electron temperature and density as a function of operational pressures

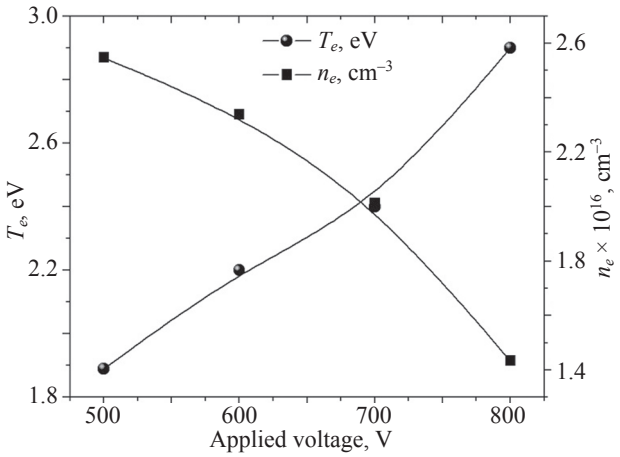


Fig. 6. Electron temperature and density as a function of applied voltage

the density of neutral gas atoms increases, leading to more frequent collisions between electrons and neutral species. Even though the T_e decreases (as mentioned earlier), the overall collisional frequency goes up, and this increases the likelihood of ionization events. In particular, more frequent collisions mean that even electrons with lower energy (due to the lower temperature) are more likely to ionize neutral atoms or molecules, resulting in an increase in the number of ions (i.e., higher plasma density) [25]. Understanding and controlling the relationship between working pressure and plasma density is crucial for optimizing the deposition process and achieving high-quality NbN thin layers tailored for specific applications such as in superconducting devices or hard coatings.

Fig. 6 illustrates the effect of discharge voltage on T_e and n_e. The voltage was recorded at a constant pressure of 0.04 mbar, with measurements taken from 500 to 800 V. As the discharge voltage increases, the ne decreases, while the T_e increases. An increase in the applied voltage during the deposition process results in a corresponding rise in the electric field within the plasma. This electric field accelerates the electrons, causing them to gain more kinetic energy. The kinetic energy of electrons in plasma is commonly described by a T_e which reflects the average energy of the electrons. As the applied voltage increases, the energy imparted to the electrons rises, leading to an increase in electron temperature. This higher electron temperature boosts ionization rates, sputtering efficiency, and reactivity, leading to changes in the deposition rate and the properties of the resulting NbN thin film. While this can improve film quality, it also needs to be carefully controlled to avoid unwanted stress, defects, or non-ideal phases in the NbN layer. On other hand, as electron temperature rises, the rate of recombination of ions and electrons may also increase, further decreasing electron density. This can be exacerbated in high-voltage conditions where the average electron energy exceeds the ionization potential of the neutral gas. A reduction in electron density may impact the ionization of precursor gases, which is a pivotal step in the deposition process. A diminished electron density could potentially result in a decline in the reactive species essential for the formation of high-quality NbN films, consequently influencing properties such as stoichiometry and crystalline structure [26].

As illustrated in Table 3, there is a notable decline in both λ_D and N_D. Conversely, the value of W_{pe} increases

Table 3. Variation of Debye length, Debye number and plasma frequency with working pressure

Working presser, mbar	Debye length $\lambda_D \times 10^{-4}$, cm	Debye number $N_D \times 10^4$	Plasma frequency $W_{pe} \times 10^9$, red. s^{-1}
0.04	3.52	7.90	1.02
0.05	2.92	6.29	1.39
0.10	1.51	3.25	2.69
0.26	1.38	2.98	2.93
0.33	0.96	2.07	4.21

Table 4. Variation of Debye length, Debye number and plasma frequency with applied voltage

Applied voltage, V	Debye length $\lambda_D \times 10^{-4}$, cm	Debye number $N_D \times 10^3$	Plasma frequency $W_{pe} \times 10^9$, red. s^{-1}
500	4.50	9.7	8.99
600	4.69	10.1	8.62
700	5.06	10.9	7.94
800	6.01	12.1	6.75

in conjunction with an increase in working pressure. At short distances, an increase in electron density enhances the shielding effect, which corresponds to an increase in electron density with increasing pressure. In order to confront the external potential, smaller Debye lengths are required due to the large charge-to-volume ratio. Conversely, N_D is directly proportional to the cube of λ_D and electron density, therefore N_D decreases with increasing pressure. Additionally, the W_{pe} rises in conjunction with density. Consequently, as pressure rises, the number of molecules within the chamber increases, leading to an uptick in both electron density and W_{pe} [27]. The variations in Debye length, Debye number, and plasma frequency as functions of pressure and applied voltage are presented in Tables 3 and 4.

Conclusion

Optical emission spectroscopy has been used to investigate the plasma properties within a magnetron sputtering system, specifically during the deposition of niobium thin layers under various conditions. The study experimentally examined the characteristics of a glow discharge in an Ar:N_2 gas mixture, varying contribution N_2 mixture to 20, 30, and 70 %. The emission intensity of selected spectral lines was analyzed to evaluate the electron temperature and electron number density under differencing operational pressures and applied voltage conditions, while keeping other parameters constant. The results indicate that an N_2 contribution of approximately 30 % in the Ar:N_2 mixture is optimal for the growth of homogeneous nanoparticle coatings compare to the 20 % and 50 % cases. The plasma produced exhibited more complex emission spectra, with enhanced contributions from the vibrational and rotational states of nitrogen, resulting in more pronounced argon lines than those observed when argon was the sole component. Furthermore, an increase in the applied voltage results in a rise in electron temperature, whereas an increase in working pressure is accompanied by a decrease in electron temperature. While the density of electrons decreased with increasing applied voltage, it increased with rising working pressure. The temperature of electron to range between 1.8 and 2.9 eV and the electron density was found to be about of 10^{15} to 10^{16} cm^{-3}.

References

1. Laroussi M. Low temperature plasma jets: characterization and biomedical. *Plasma*, 2020, vol. 3, no. 2, pp. 54–58. https://doi.org/10.3390/plasma3020006
2. Hankins O.E., Bourham M.A., Mann D. Observations of visible light emission from interactions between an electrothermal plasma and a propellant. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1997, vol. 33, no. 1, pp. 295–298. https://doi.org/10.1109/20.559972
3. Pereira S., Pinto E., Ribeiro P.A., Sério S. Study of a Cold Atmospheric Pressure Plasma jet device for indirect treatment of squamous cell carcinoma. *Clinical Plasma Medicine*, 2019, vol. 13, pp. 9–14. https://doi.org/10.1016/j.cpme.2018.09.001
4. Roomy H., Yasoob N., Murbat H. Evaluate the argon plasma jet parameters by optical emission spectroscopy. *Kuwait Journal of Science*, 2023, vol. 50, no. 2, pp. 163–167. https://doi.org/10.1016/j.kjs.2023.03.001
5. Lars Z. Overview of electric field applications in energy and process engineering. *Energies*, 2018, vol. 11, no. 6, pp. 1361. https://doi.org/10.3390/en11061361
6. Jabur Y.K., Hammed M.G., Khalaf M.K. DC glow discharge plasma characteristics in Ar/O_2 gas mixture. *Iraqi Journal of Science*, 2021, vol. 62, no. 2, pp. 475–482. https://doi.org/10.24996/ijs.2021.62.2.13
7. Jabur Y.K., Khalaf M.K., Hammed M.G. A comparative study of the electrical characteristics of generating argon plasma in different inter-electrode spacing discharges. *International Journal of Nanoelectronics and Materials*, 2020, vol. 13, no. 3, pp. 493–500.
8. Zaplotnik Z., Primc G., Vesel A. Optical emission spectroscopy as a diagnostic tool for characterization of atmospheric plasma jets. *Applied Sciences*, 2021, vol. 11, no. 5, pp. 2275. https://doi.org/10.3390/app11052275
9. Hameed T.A., Kadhem S.J. Plasma diagnostic of gliding arc discharge at atmospheric pressure. *Iraqi Journal of Science*, 2019, vol. 60, no. 12, pp. 2649–2655. https://doi.org/10.24996/ijs.2019.60.12.14
10. Wybranowski T., Ziomkowska B., Cyrankiewicz M., Bosek M., Pyskir J., Napiórkowska M., Kruszewski S. A study of the oxidative processes in human plasma by time-resolved fluorescence spectroscopy. *Scientific Reports*, 2022, vol. 12, no. 1, pp. 9012. https://doi.org/10.1038/s41598-022-13109-0
11. Stryczewska H.D., Boiko O. Applications of plasma produced with electrical discharges in gases for agriculture and biomedicine. *Applied Sciences*, 2022, vol. 12, no. 9, pp. 4405. https://doi.org/10.3390/app12094405
12. Dyatko N.A., Ionikh Y.Z., Napartovich A.P. Influence of nitrogen admixture on plasma characteristics in a DC argon glow discharge and in afterglow. *Atoms*, 2019, vol. 7, no. 1, pp. 13. https://doi.org/10.3390/atoms7010013

Литература

1. Laroussi M. Low temperature plasma jets: characterization and biomedical // Plasma. 2020. V. 3. N 2. P. 54–58. https://doi.org/10.3390/plasma3020006
2. Hankins O.E., Bourham M.A., Mann D. Observations of visible light emission from interactions between an electrothermal plasma and a propellant // IEEE Transactions on Magnetics. 1997. V. 33. N 1. P. 295–298. https://doi.org/10.1109/20.559972
3. Pereira S., Pinto E., Ribeiro P.A., Sério S. Study of a Cold Atmospheric Pressure Plasma jet device for indirect treatment of squamous cell carcinoma // Clinical Plasma Medicine. 2019. V. 13. P. 9–14. https://doi.org/10.1016/j.cpme.2018.09.001
4. Roomy H., Yasoob N., Murbat H. Evaluate the argon plasma jet parameters by optical emission spectroscopy // Kuwait Journal of Science. 2023. V. 50. N 2. P. 163–167. https://doi.org/10.1016/j.kjs.2023.03.001
5. Lars Z. Overview of electric field applications in energy and process engineering // Energies. 2018. V. 11. N 6. P. 1361. https://doi.org/10.3390/en11061361
6. Jabur Y.K., Hammed M.G., Khalaf M.K. DC glow discharge plasma characteristics in Ar/O2 gas mixture // Iraqi Journal of Science. 2021. V. 62. N 2. P. 475–482. https://doi.org/10.24996/ijs.2021.62.2.13
7. Jabur Y.K., Khalaf M.K., Hammed M.G. A comparative study of the electrical characteristics of generating argon plasma in different inter-electrode spacing discharges // International Journal of Nanoelectronics and Materials. 2020. V. 13. N 3. P. 493–500.
8. Zaplotnik Z., Primc G., Vesel A. Optical emission spectroscopy as a diagnostic tool for characterization of atmospheric plasma jets // Applied Sciences. 2021. V. 11. N 5. P. 2275. https://doi.org/10.3390/app11052275
9. Hameed T.A., Kadhem S.J. Plasma diagnostic of gliding arc discharge at atmospheric pressure // Iraqi Journal of Science. 2019. V. 60. N 12. P. 2649–2655. https://doi.org/10.24996/ijs.2019.60.12.14
10. Wybranowski T., Ziomkowska B., Cyrankiewicz M., Bosek M., Pyskir J., Napiórkowska M., Kruszewski S. A study of the oxidative processes in human plasma by time-resolved fluorescence spectroscopy // Scientific Reports. 2022. V. 12. N 1 P. 9012. https://doi.org/10.1038/s41598-022-13109-0
11. Stryczewska H.D., Boiko O. Applications of plasma produced with electrical discharges in gases for agriculture and biomedicine // Applied Sciences. 2022. V. 12. N 9. P. 4405. https://doi.org/10.3390/app12094405
12. Dyatko N.A., Ionikh Y.Z., Napartovich A.P. Influence of nitrogen admixture on plasma characteristics in a DC argon glow discharge and in afterglow // Atoms. 2019. V. 7. N 1. P. 13. https://doi.org/10.3390/atoms7010013

13. Wu Y., Cheng J.-H., Sun D.-W. Blocking and degradation of aflatoxins by cold plasma treatments: Applications and mechanisms. *Trends in Food Science & Technology*, 2021, vol. 109, pp. 647–661. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.01.053
14. Ananthanarasimhan J., Gangwar R.K., Leelesh P., Srikar P.S.N.S.R., Shivapuji A.M., Roa L. Estimation of electron density and temperature in an argon rotating gliding arc using optical and electrical measurements. *Journal of Applied Physics*, 2021, vol. 129, no. 22, pp. 223301. https://doi.org/10.1063/5.0044014
15. Carter J.A., Barros A.I., Nóbrega J.A., Donati G.L. Traditional calibration methods in atomic spectrometry and new calibration strategies for inductively coupled plasma mass spectrometry. *Frontiers in Chemistry*, 2018, vol. 6, pp. 504. https://doi.org/10.3389/fchem.2018.00504
16. Higuchi T., Noma M., Yamashita M., Urabe K., Hasegawa S., Eriguchi. K. Characterization of surface modification mechanisms for boron nitride films under plasma exposure. *Surface and Coatings Technology*, 2019, vol. 377, pp. 124854. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.07.071
17. Nasakina E.O., Sevostyanov M.A., Baikin A.S., Konushkin S.V., Sergienko K.V., Kaplan M.A., Fedyuk I.M., Leonov A.V., Kolmakov A.G. Using of magnetron sputtering for biocompatible composites creating. *Advances in Composite Materials Development*, 2018, pp. 3–23. https://doi.org/10.5772/intechopen.79609
18. Doyle S.J. *A study of optical and physical probe diagnostic techniques for atmospheric-pressure plasmas*. A thesis degree of Master of Science in Engineering. Huntsville, University of Alabama, 2017. 109 p.
19. Adams S.F., Murray C.S., Pohl N.A. Electron temperature measurement from neutral atomic tungsten emission line ratio. *Review of Scientific Instruments*, 2025, vol. 96, no. 1, pp. 013502. https://doi.org/10.1063/5.0238579
20. Khalaf M.K., Al-Gaffer A.N.A., Mohsin R.H. Estimation of plasma parameters in vanadium magnetron sputtering using optical emission spectroscopy at different experimental formation conditions. *AIP Conference Proceedings*, 2020, vol. 2290, pp. 050040. https://doi.org/10.1063/5.0027435
21. Devia D.M., Rodriguez-Restrepo L.V., Restrepo-Parra E. Methods employed in optical Emission Spectroscopy Analysis: a review. *Ingeniería y Ciencia*, 2015, vol. 11, no. 21, pp. 239–267. https://doi.org/10.17230/ingciencia.11.21.12
22. Ley H. Analytical methods in plasma diagnostic by optical emission spectroscopy: a tutorial review. *Journal of Science and Technology*, 2014, vol. 6, no. 1, pp. 49–66.
23. Bittencourt J.A. *Fundamentals of Plasma Physics*. Springer, 2004, 679 p. https://doi.org/10.1007/978-1-4757-4030-1
24. Dobbyn K. *Design and application of a plasma impedance monitor for RF plasma diagnostics*. A thesis for the degree of Master of Science. Dublin City University, 2000. 84 p.
25. Akatsuka H., Tanaka Y. Discussion on electron temperature of gas-discharge plasma with non-Maxwellian electron energy distribution function based on entropy and statistical physics. *Entropy*, 2023, vol. 25, no. 2, pp. 276. https://doi.org/10.3390/e25020276
26. Chen H., Yuan D., Wu A., Lin X., Li X. Review of low-temperature plasma nitrogen fixation technology. Waste Disposal & Sustainable *Energy*, 2021, vol. 3, no. 3, pp. 201–217. https://doi.org/10.1007/s42768-021-00074-z
27. Goldston R.J., Rutherford P.H. *Introduction to Plasma Physics*. CRC Press, 1995, 510 p. https://doi.org/10.1201/9780367806958

13. Wu Y., Cheng J.-H., Sun D.-W. Blocking and degradation of aflatoxins by cold plasma treatments: Applications and mechanisms // Trends in Food Science & Technology. 2021. V. 109. P. 647–661. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.01.053
14. Ananthanarasimhan J., Gangwar R.K., Leelesh P., Srikar P.S.N.S.R., Shivapuji A.M., Roa L. Estimation of electron density and temperature in an argon rotating gliding arc using optical and electrical measurements // Journal of Applied Physics. 2021. V. 129. N 22. P. 223301. https://doi.org/10.1063/5.0044014
15. Carter J.A., Barros A.I., Nóbrega J.A., Donati G.L. Traditional calibration methods in atomic spectrometry and new calibration strategies for inductively coupled plasma mass spectrometry // Frontiers in Chemistry. 2018. V. 6. P. 504. https://doi.org/10.3389/fchem.2018.00504
16. Higuchi T., Noma M., Yamashita M., Urabe K., Hasegawa S., Eriguchi. K. Characterization of surface modification mechanisms for boron nitride films under plasma exposure // Surface and Coatings Technology. 2019. V. 377. P. 124854. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.07.071
17. Nasakina E.O., Sevostyanov M.A., Baikin A.S., Konushkin S.V., Sergienko K.V., Kaplan M.A., Fedyuk I.M., Leonov A.V., Kolmakov A.G. Using of magnetron sputtering for biocompatible composites creating // Advances in Composite Materials Development. 2018. P. 3–23. https://doi.org/10.5772/intechopen.79609
18. Doyle S.J. A study of optical and physical probe diagnostic techniques for atmospheric-pressure plasmas. A thesis degree of Master of Science in Engineering. Huntsville, University of Alabama, 2017. 109 p.
19. Adams S.F., Murray C.S., Pohl N.A. Electron temperature measurement from neutral atomic tungsten emission line ratio // Review of Scientific Instruments. 2025. V. 96. N 1. P. 013502. https://doi.org/10.1063/5.0238579
20. Khalaf M.K., Al-Gaffer A.N.A., Mohsin R.H. Estimation of plasma parameters in vanadium magnetron sputtering using optical emission spectroscopy at different experimental formation conditions // AIP Conference Proceedings. 2020. V. 2290. P. 050040. https://doi.org/10.1063/5.0027435
21. Devia D.M., Rodriguez-Restrepo L.V., Restrepo-Parra E. Methods employed in optical Emission Spectroscopy Analysis: a review // Ingeniería y Ciencia. 2015. V. 11. N 21. P. 239–267. https://doi.org/10.17230/ingciencia.11.21.12
22. Ley H. Analytical methods in plasma diagnostic by optical emission spectroscopy: a tutorial review // Journal of Science and Technology. 2014. V. 6. N 1. P. 49–66.
23. Bittencourt J.A. Fundamentals of Plasma Physics. Springer, 2004. 679 p. https://doi.org/10.1007/978-1-4757-4030-1
24. Dobbyn K. Design and application of a plasma impedance monitor for RF plasma diagnostics. A thesis for the degree of Master of Science. Dublin City University, 2000. 84 p.
25. Akatsuka H., Tanaka Y. Discussion on electron temperature of gas-discharge plasma with non-Maxwellian electron energy distribution function based on entropy and statistical physics // Entropy. 2023. V. 25. N 2. P. 276. https://doi.org/10.3390/e25020276
26. Chen H., Yuan D., Wu A., Lin X., Li X. Review of low-temperature plasma nitrogen fixation technology // Waste Disposal & Sustainable Energy. 2021. V. 3. N 3. P. 201–217. https://doi.org/10.1007/s42768-021-00074-z
27. Goldston R.J., Rutherford P.H. Introduction to Plasma Physics. CRC Press, 1995. 510 p. https://doi.org/10.1201/9780367806958

Authors

Harakat Mohsin Roomy — PhD, Full Professor, Ministry of Education, Baghdad, 10011, Iraq, https://orcid.org/0000-0002-7919-4463, hrkatm37@gmail.com
Mohammed K. Khalaf — PhD, Full Professor, Ministry of Science and Technology, Baghdad, 10011, Iraq, https://orcid.org/0000-0001-5688-6304, mohammed.k.khalaf@src.edu.iq
Mohammed G. Hammed — PhD, Full Professor, University of Anbar, Anbar, 31011, Iraq, SC 59162014200, https://orcid.org/0000-0002-0226-702X, Sc.moh72_gh@uoanbar.edu.iq

Авторы

Руми Мохсин Харакат — PhD, профессор, профессор, Министерство образования, Багдад, Ирак, https://orcid.org/0000-0002-7919-4463, hrkatm37@gmail.com
Халаф К. Мохаммед — PhD, профессор, профессор, Министерство образования, Багдад, Ирак, https://orcid.org/0000-0001-5688-6304, mohammed.k.khalaf@src.edu.iq
Хаммед Г. Мохаммед — PhD, профессор, профессор, Университет Анбар, колледж науки, Анбар, 31011, Ирак, SC 59162014200, https://orcid.org/0000-0002-0226-702X, Sc.moh72_gh@uoanbar.edu.iq

Received 12.02.2025
Approved after reviewing 12.06.2025
Accepted 19.07.2025

Статья поступила в редакцию 12.02.2025
Одобрена после рецензирования 12.06.2025
Принята к печати 19.07.2025

Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ
июль–август 2025 Том 25 № 4 http://ntv.ifmo.ru/
SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL OF INFORMATION TECHNOLOGIES, MECHANICS AND OPTICS
Jule–August 2025 Vol. 25 No 4 http://ntv.ifmo.ru/en/
ISSN 2226-1494 (print) ISSN 2500-0373 (online)

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ

doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-4-626-634

Spectral diagnostics of Al-Ni alloys under laser irradiation: effect of laser energy on plasma parameters

Mohammed Hamza Jawad[1]✉, Mohammed Ridha Abdulameer[2], Kadhim Abdulwahid Aadim[3]

[1,2,3] University of Baghdad, Baghdad, 00964, Iraq

[1] mohammed.hamza1204a@sc.uobaghdad.edu.iq✉, https://orcid.org/0009-0001-8111-8195
[2] mohammed_plasma@sc.uobaghdad.edu.iq, https://orcid.org/0000-0002-7395-9840
[3] kadhim.aadim@ilps.uobaghdad.edu.iq, https://orcid.org/0000-0003-4533-5309

Abstract

In this research, the effect of laser beam energy on the properties and behavior of plasma produced from aluminum and nickel alloy was studied using the Optical Stimulated Emission Spectroscopy method. The properties of the plasma were characterized by exposing the target material (the alloy) to high-energy laser pulses ranging from 500 to 900 mJ using a pulsed Nd:YAG laser with a pulse rate of up to 50 Hz. This ensures a balanced energy distribution and allows monitoring of the increasing effects in the plasma without strong thermal effects. This method allows for a detailed study of the physical properties of the plasma, including the spectral radiation intensity and associated emission peak as well as the study of various plasma properties such as temperature and electron density and other plasma parameters, including the plasma frequency, Debye length, and Debye number. The results obtained show that both temperature and density increase with increasing laser power, with both effects peaking at a laser power of 900 mJ. Calculations of the plasma frequency and Debye number also show a concomitant increase in these two effects with increasing laser power. This work demonstrates how laser power can increase plasma stability and significantly improve physical processes within plasma. It also demonstrates how diagnostic techniques can be useful in plasma analysis and have numerous medical, industrial, and technological applications.

Keywords

Al-Ni alloy, optical spectroscopy of plasma, OES, plasma properties, plasma parameters

For citation: Jawad M.H., Abdulameer M.R., Aadim K.A. Spectral diagnostics of Al-Ni alloys under laser irradiation: effect of laser energy on plasma parameters. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2025, vol. 25, no. 4, pp. 626–634. doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-4-626-634

УДК 543.428

Спектральный анализ сплавов Al-Ni при лазерном облучении: влияние энергии лазера на параметры плазмы

Мохаммед Хамза Джавад[1]✉, Мохаммед Ридха Абдуламир[2], Кадхим Абдулвахид Аадим[3]

[1,2,3] Университет Багдада, Багдад, 00964, Ирак

[1] mohammed.hamza1204a@sc.uobaghdad.edu.iq✉, https://orcid.org/0009-0001-8111-8195
[2] mohammed_plasma@sc.uobaghdad.edu.iq, https://orcid.org/0000-0002-7395-9840
[3] kadhim.aadim@ilps.uobaghdad.edu.iq, https://orcid.org/0000-0003-4533-5309

Аннотация

Исследованы свойства и поведение плазмы, полученной из алюминиево-никелевых сплавов при лазерном облучении. Исследование выполнено методом оптической стимулированной эмиссионной спектроскопии. Свойства плазмы модулировались путем воздействия на целевой материал (сплав) высокоэнергетическими лазерными импульсами в диапазоне энергий от 500 до 900 мДж с использованием импульсного лазера Nd:YAG при частоте импульсов до 50 Гц. Это обеспечивает сбалансированное распределение энергии и позволяет контролировать нарастающие эффекты в плазме без сильных тепловых эффектов. Примененный метод позволяет детально изучать физические свойства плазмы, включая спектральную интенсивность излучения и связанный с

© Jawad M.H., Abdulameer M.R., Aadim K.A., 2025

ней пик излучения, исследовать различные свойства плазмы, такие как электронные температура и плотность, а также другие параметры плазмы, включая плазменную частоту, длину и число Дебая. Полученные результаты показывают, что электронные температура и плотность увеличиваются с повышением мощности лазера, причем оба эффекта достигают максимума при мощности импульсов лазера 900 мДж. Расчеты плазменной частоты и числа Дебая также демонстрируют увеличение этих двух эффектов с ростом мощности импульсов лазера. Выполненное исследование показывает, что путем изменения мощности лазера можно повысить стабильность плазмы и значительно улучшить баланс физических процессов внутри плазмы. Предложенные методы исследования могут быть полезны при анализе плазмы и иметь многочисленные медицинские, промышленные и технологические приложения.

Ключевые слова
сплав Al-Ni, оптическая спектроскопия плазмы, ОЭС, свойства плазмы, параметры плазмы

Ссылка для цитирования: Джавад М.Х., Абдуламир М.Р., Аадим К.А. Спектральный анализ сплавов Al-Ni при лазерном облучении: влияние энергии лазера на параметры плазмы // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2025. Т. 25, № 4. С. 626–634 (на англ. яз.). doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-4-626-634

Introduction

Plasma can be generated by a very high temperature rise in the material to reach a stage where we can overcome the electrostatic forces that bind the material electrons to the nucleus [1]. Plasma radiation depends on the properties of the isolated radiation types and the surrounding environment around the radiation. This dependence results from the fact that electrons and ions can interact with other material due to the effect of Coulomb forces which have a long-term effect and action [2]. Plasma spectrum analysis is one of the most important methods we use to study and understand the properties of plasma used in many applications, whether in technological or industrial applications or in research such as plasma physics and space sciences where plasma can be divided based on its temperature into two types: the first is hot plasma or what is called fusion plasma, and the second type is cold plasma or gas discharge plasma [3]. If the plasma temperature drops from 300 K to 1 K, this type of plasma will be called super cold plasma. This type can be generated in a vacuum by ionizing atoms that are cooled using a laser [3].

The method of using a laser beam is considered one of the most important and popular techniques used in producing plasma. This is done by focusing a high-energy laser pulse on any material whether this material is solid, liquid, or gaseous. The resulting radiation will cause local thermal equilibrium, severe vaporization of the material and collapse of the material at the point of focus [4–6]. The interaction between matter and the laser beam will depend on a set of physical and mechanical properties as well as some chemical properties, in addition to the properties and specifications of the laser used, such as the power of the laser pulse, the focusing time, and the wavelength used [7–9].

Optical radiation analysis is one of the common methods used to examine and diagnose plasma which can provide us with important information about the sample used as well as the information about the plasma produced, as the plasma produced by laser will produce different and varied radiation spectra most of which extend between the ultraviolet region to the visible and infrared regions. This method depends on the analysis of the optical emissions generated by the plasma using a laser, which is often known as laser-induced plasma analysis or Laser-Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS) [10, 11].

LIBS technology is used to determine the main components of the targets using conventional and non-conventional calibration methods that are considered free from calibration. Due to the need for immediate and rapid tests that determine the components of material, this method has evolved very quickly in many applications, since it is used to obtain rapid results in laboratories and the field of industry, as this can be done from long distances of up to 110 meters, and there is no need to prepare samples before starting the test [12, 13].

Spectral line broadening mechanisms such as Stark broadening detract from accurate results or reduce the quality of the spectrum in LIBS technology, as these defects can be controlled by adjusting the time and the width of the acquisition window, but they ultimately limit the acquisition of quantitative and analytical data and isotope information. Therefore, many attempts have been made to increase the accuracy of the spectrum and improve the quality of detection in the LIBS system [14]. These attempts included the repeated use of laser pulses and performing the diagnosis using more than one energy as well as the processes of improving the spectrometer angle by changing its angles to reach the best possible angle for reading the spectrum [15–18].

The main objective of this study was to investigate the laser-stimulated light emission using locally prepared 80:20 aluminum-nickel (Al-Ni) alloy to determine the general properties of the plasma generated by these alloys. This distinguishes our study from most previous studies that relied on taking the spectrum of a single element or doping a specific element with another. This alloy provides greater stability in its interaction with the plasma compared to aluminum or nickel alone, which aids in more accurate analysis and characterization because the response is somewhat more diverse when exposed to laser pulses. Fig. 1 shows a cross-section of the alloy used.

Materials and methodology

Preparing an Al-Ni Alloy for Laser Blasting

An Al-Ni alloy was locally prepared with a composition ratio of 80:20 using a gas furnace to ensure optimal homogeneity of the constituent material. The purity of the elements from which the alloy was made reached 98 %. A sample of this alloy 2 cm^2 and 4 mm thick was taken and

Fig. 1. Al-Ni alloy

placed on the laser base holder where it was prepared for the ablation process.

Experimental LIPS setup

Fig. 2 shows a schematic diagram of the LIBS system used in this experiment. A pulsed Nd:YAG laser with a frequency of 6 kHz and a wavelength of 1064 nm was used. Different laser energies (500 to 900 mJ) and pulse rates of up to 50 Hz were used. The sample was placed on a metal support surface, and the laser was focused at a 45° angle to initiate the ablation process. The resulting optical data were then collected using a Surwit S3000-UV-NIR spectrometer which is characterized by its rapid response to changes in emitted radiation and operates in the ultraviolet, infrared, and visible light ranges across the wavelength range of 200 to 1000 nm. These spectra were recorded on a control unit (PC) to initiate the analysis and data extraction process.

Results and Discussion

The plasma produced by the Al-Ni alloy was characterized using stimulated photoemission spectroscopy. The emission spectrum of this alloy plasma consists of optical radiation resulting from the decay of excited elements within the plasma, and the spectrum is often presented in the form of spectral lines characteristic of atoms or ions. The spectral range for the alloy used ranged from 200 nm to 800 nm for most of its constituent elements. The emission peaks for all elements were compared with data from the National Institute of Standards and Technology (NIST)[1].

Fig. 3 shows that there are several emission peaks for the elements that make up the Al-Ni alloy. Aluminum emitted at wavelengths of 235.5, 256.5, 280.5, 308.2, 324.1, 345.2, 465.3, and 521 nm, while nickel emitted at wavelengths of 357.7, 394.6, 452.3, 485.5, 514.6, and 546.8 nm. On the other hand, we saw several peaks for nitrogen emission, the most prominent of which was at a wavelength of 623.8 nm, as well as several peaks for oxygen, the most prominent of which was at a wavelength of 0.2 nm.

It was noted, as shown in the Fig. 3, that the intensity of the emission of spectral lines will increase with the increase in the energy of the laser used, as the main reason for this is because of the rise in the removal of electrons caused by the laser energy during the process of ionization of the elements which increased the production of ions [19]. These results show that the behavior of Al-Ni alloy plasma differs from that of pure material such as aluminum and nickel alone, as the complex composition of the alloy affects the intensity of the spectral emissions and the ratio between aluminum and nickel, indicating the presence of complex interconnected excitation and ionization processes within the plasma. The nickel to aluminum ratio changed with laser energies, showing that nickel is strongly ionized despite its small proportion in the alloy composition. This is due to the difference in ionization energies and the properties of energy transfer between atoms within the produced plasma. The Al-Ni emission intensity ratios were calculated at different laser energies and found to be approximately 1.22 at 500 mJ, 1.21 at

[1] NIST Atomic Spectra Database Lines Form. Available at: https://www.nist.gov/pml/atomic-spectra-database, free. English lang. (accessed: 15.07.2025).

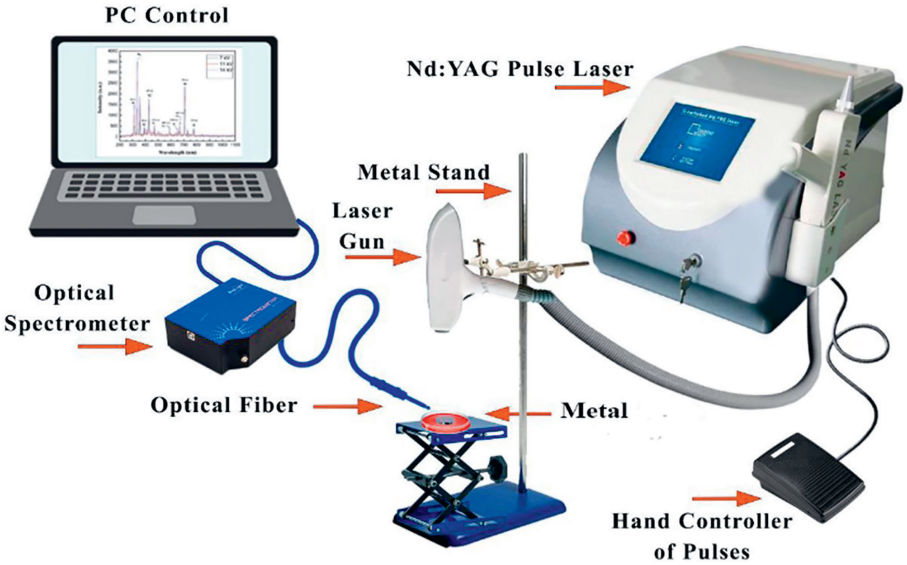


Fig. 2. Basic components of an induced laser spectroscopy system

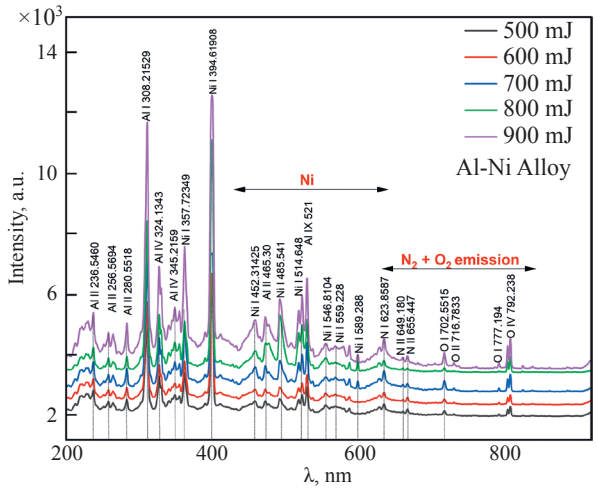


Fig. 3. Plasma emission spectrum for an Al-Ni target at different laser intensity

600 mJ, 1.03 at 700 mJ, 1.37 at 800 mJ, and 1.09 at 900 mJ. These values were close to unity, indicating that nickel, despite its lower proportion in the alloy exhibited emissions like, or sometimes higher than, aluminum. The physical reason for this is the difference in ionization energies and energy transfer probabilities between the two elements. Aluminum has lower ionization energy and therefore ionizes more easily, while nickel produces more intense lines due to the higher transfer probabilities for some of its lines. Furthermore, the alloy composition played an important role in plasma formation because of the presence of more than one element created a complex plasma environment that affected the excitation and ionization processes, causing varying emission ratios. These results confirmed that the alloy was not merely a mixture but rather an interconnected plasma environment, which makes the plasma behave differently from pure metals. Thus, these ratios are an important indicator for understanding the interaction of elements in plasma and improving the accuracy of LIBS analysis. The results of this study are compared with previous studies that addressed plasma behavior in pure metals and some alloy using LIBS. For example, Hanif et al. [20] analyzed nickel plasma using an Nd:YAG laser, showing the effect of laser parameters on plasma properties such as electron temperature and electron density. Another study by Ahmed et al. [21] compared copper-nickel alloy using multiple techniques, such as LIBS, LA-TOF, EDX, and XRF, demonstrating the importance of using multiple techniques to accurately analyze alloy. Compared to these studies, our research highlights the advantages of LIBS analysis of Al-Ni alloy contributing to improved analytical accuracy and understanding of plasma behavior in alloy compared to pure metals [22].

Table 1. Basic parameters of Al-Ni Alloy plasma

Element	λ_{NIST}, nm	A_G, s^{-1}	E_j, eV
Ni	357.72349	$8.00 \cdot 10^4$	3.739751
	394.61908	$1.50 \cdot 10^3$	3.306149
	452.31425	$2.90 \cdot 10^0$	2.740339
	485.54100	$2.80 \cdot 10^8$	6.094943
	546.81040	$5.50 \cdot 10^6$	6.114134

The Boltzmann diagram method was used to calculate the electron temperature in the plasma produced by an Al-Ni alloy after exposing it to a laser beam. Specific wavelengths from the resulting spectrum were used for this purpose: 357.72349 nm, 394.61908 nm, 452.31425 nm, 485.541 nm, and 546.8104 nm, which are due to the emission of nickel, according to the data shown in the Table 1.

In Table 1, A_G refers to the Einstein coefficient for spontaneous emission, which represents the transition probability of an excited electron decaying to a lower energy level expressed in units of s^{-1}.

This process involved extracting the electron energy E_j for each wavelength by comparing the spectrum data with the NIST database. Energy data for each wavelength were obtained to apply them to the Boltzmann equation below to calculate the electron temperature in the plasma [23].

$$\ln\left[\frac{\lambda_{ji} I_{ji}}{hcA_{ji}g_j}\right] = \frac{1}{k_B T}(E_j) + \ln N/U(T). \qquad (1)$$

Eq. (1) shows the dependence of $\ln(\lambda_{ji} I_{ji}/A_{ji} g_i)$ versus E_j, where λ_{ji} represents the radiation intensity at wavelength λ; E_j is the maximum energy associated with this wavelength; h Planck's constant; c is the speed of light in a vacuum; k_B is the Boltzmann constant, which is used in thermodynamic energy equations; T represents the absolute temperature of the substance being measured; N stands for the number of molecules or atoms in the system; U is the internal energy of the system at temperature T. I_{ji} represents the intensity of the spectral line corresponding to the transition from the upper-level j to the lower level i; A_{ji} is the Einstein coefficient for spontaneous emission associated with this transition expressed in s^{-1}; and g_j is the statistical weight (degeneracy) of the upper energy level j.

When the relationship between the variables is plotted, the resulting slope represents the relationship $1/k_B T$, which was used to calculate the electron temperature. The results obtained through this analysis showed that the electron temperature increases significantly with increasing laser beam energy. The highest temperature reached by the electrons was 0.726 eV at a laser energy of 900 mJ. The closer its value is to one, the higher the accuracy.

Fig. 4 shows the results of the Boltzmann plot between $\ln(\lambda_{ji} I_{ji}/A_{ji} g_i)$ versus E_j for different energies used. R^2 represents the correlation coefficient which reflects the accuracy of the graph and the correlation of the points with each other.

One of the most important and common methods for calculating electron density is the Stark exposure measurement which is calculated from the width of a single spectral line of an atom or ion. This effect is a direct result of the collision of charged particles and atoms. This effect is a physical phenomenon that occurs when a charged gas is exposed to an external electric field. Due to this interaction, the movement of electrons will change, thus causing a broadening of the spectral lines, which directly affects the electron density. The relationship between density and

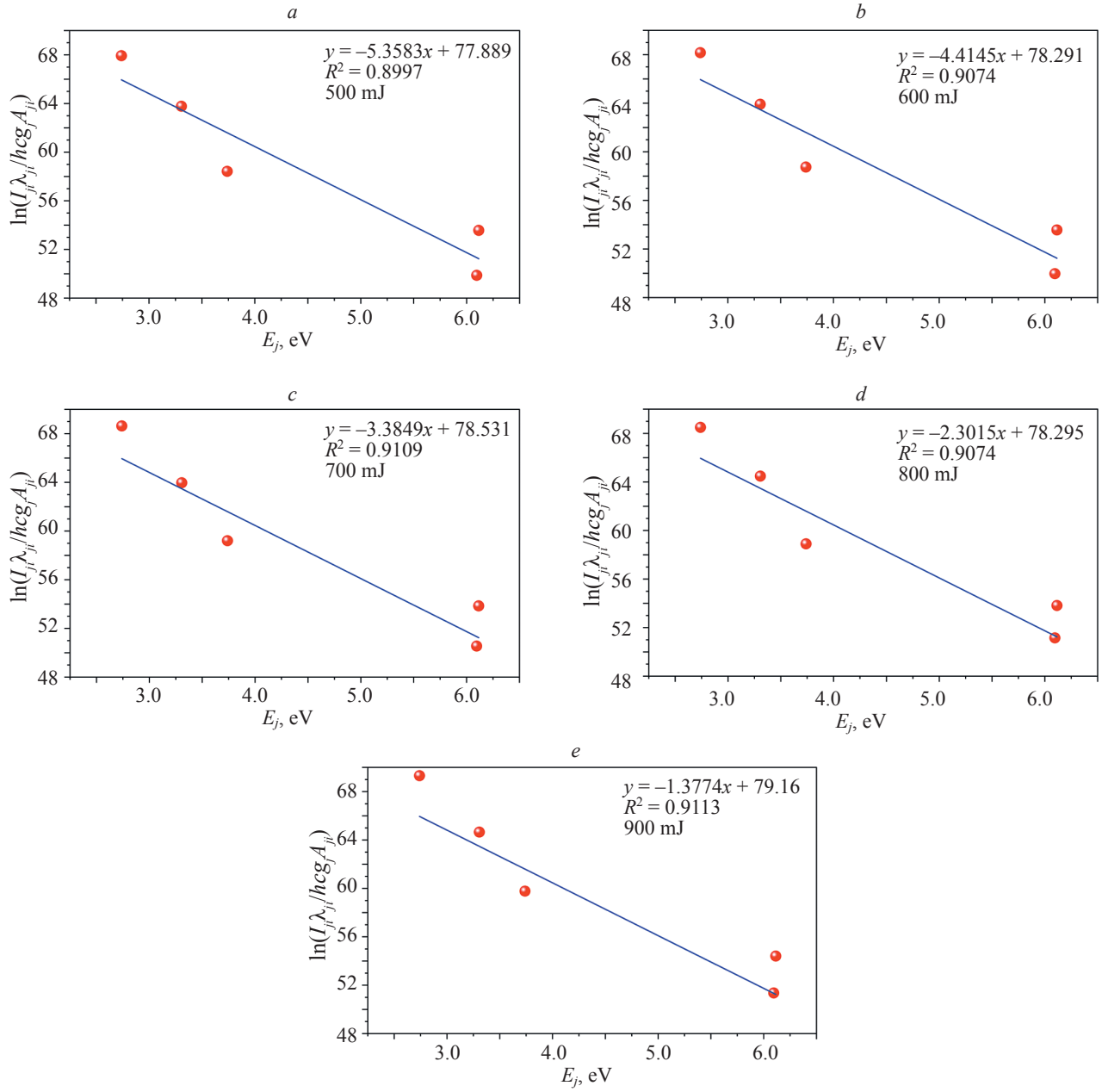


Fig. 4. Boltzmann diagrams for the Al-Ni alloy at energies, mJ: 500 (*a*), 600 (*b*), 700 (*c*), 800 (*d*), 900 (*e*)

spectral line width is a direct relationship. This can be expressed mathematically using equation from [23]:

$$n_e(\text{cm}^{-3}) = \left(\frac{\Delta\lambda_{\text{FWHM}}}{2w}\right)\cdot 10^{17}. \qquad (2)$$

This equation represents the dependence of electron density n_e on the Full Width at Half Maximum (FWHM) ($\Delta\lambda_{\text{FWHM}}$), where $\Delta\lambda_{\text{FWHM}}$ stands for the spectral line width at half its maximum intensity, and w represents the width of the line at its minimum intensity. The full width at mid-intensity of the alloy is represented by Fig. 5, which represents the calculated exposure for the electron density (2) for the wavelength 394 nm. The electron density has risen gradually with the escalation in the laser energy employed, where it was equal to ($4.01\cdot10^{17}$ cm^{-3}) for an energy of 500 mJ, while it reached its peak at an energy of 900 mJ, where it was equal to ($6.13\cdot10^{17}$ cm^{-3}). This increase is attributed to the absorption of the photon energy of the laser beam by the electrons, which is what is shown to us through the drawing, where we notice the change in the Stark resonance value with the change in the energy value of the laser used.

Stark broadening is related to how an external electric field affects the emission lines produced by plasma. When plasma is exposed to an external electric field, changes will occur in the emission lines. These changes cause a broadening of the line FWHM. This broadening depends directly on the electron density in the plasma, and thus, the Stark broadening will increase as the electron density increases.

As expected and mentioned, the temperature and density of the electrons will increase with increasing laser

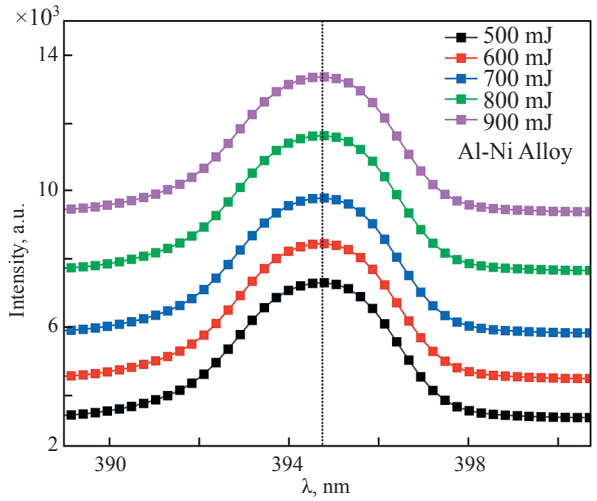


Fig. 5. Stark exposure of Al-Ni alloy

power, since this increase occurs as a result of the power of the laser having a powerful and straightforward impact on the emission lines intensity, as the value of the temperature and density of the electrons will become almost stable because the plasma will become dependent on the laser beam covering the target, and plasma shadowing occurs when the plasma itself reduces the transmission of laser energy along the beam path. Fig. 6 represents the increase and the clear difference between the density of the electrons and their temperature. These findings concur with those of Kison V.E et al. [24].

The behavior of plasma emitted by Al-Ni alloys is significantly different from that of pure metals such as aluminum or nickel alone, because the alloy composition is complex and comprises multiple elements. The presence of nickel and aluminum together creates plasma environment that differs from that of pure material as the atoms and ions interact and overlap more strongly, significantly affecting the emission spectrum. Due to the composition, the energy distribution within the plasma changes, which is reflected in the electron temperature and electron density and alters the mode of ionization and excitation. When we observe the ratio of nickel to aluminum intensities and observe their change with laser power, we realize that plasma behavior in alloys is more dynamic and variable than in pure metals. Therefore, it is important to study plasmas in alloy separately, as this understanding helps us improve the accuracy of LIBS analysis and advances industrial applications that rely on the analysis of composite material [24].

The effect of laser energy on some other plasma parameters, such as plasma frequency, Debye length, and the number of charged particles in the Debye sphere, is investigated using the main plasma parameters, which are electron density and temperature, to increase and improve the diagnosis of the plasma produced by the aluminum and nickel alloy where the Debye length λ_D is calculated from the equation [23]:

$$\lambda_D = \left[\frac{\varepsilon_o k_B T_e}{n_e e^2}\right]^{1/2} \cong 7.43\times 10^2 \left(\frac{T_e}{n_e}\right)^{1/2}, \qquad (3)$$

where T_e is the electron temperature; e is the elementary charge (the charge of a single electron), which is approximately $1.602\cdot10^{-19}$ C; n_e is the electron density, which is defined in equation (2) as the number of electrons per cubic centimeter; ε_0 is the permittivity of free space.

The following formula can be used to determine the plasma frequency f_p [23]:

$$f_p = \sqrt{\frac{e^2 n_e}{\varepsilon_0 m_e}}, \qquad (4)$$

where m_e is the electron mass, which is approximately $9.11\cdot10^{-31}$ kg.

The number of charged particles N_D in the Debye sphere can be calculated from the equation in [23]:

$$N_D = 4/3\lambda_D^3 n_e. \qquad (5)$$

Table 2 shows the data obtained for all plasma parameters formed from the Al-Ni alloy and for all laser energies used.

Fig. 7 shows the relationship and change in the value of plasma frequency and the relationship between laser beam energy and Debye length. The plasma frequency shows a significant increase with increasing energy, where the frequency value ranges from $5.7\cdot10^{12}$ to $7.0\cdot10^{12}$ Hz, while

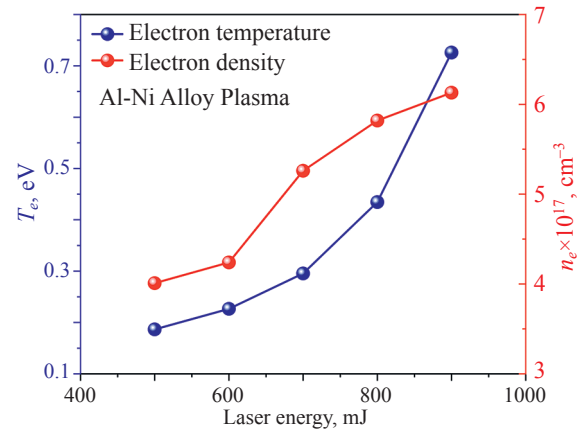


Fig. 6. Change in electron temperature T_e and density n_e as a function of laser energy

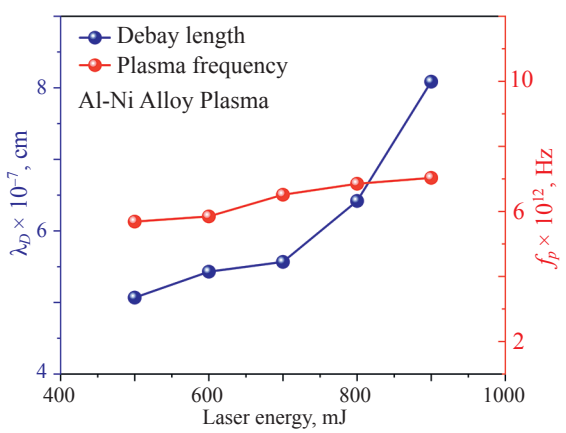


Fig 7. Variation of plasma density f_p and Debye length λ_D as a function of laser power

Table 2. Main parameters of Al-Ni alloy plasma generated under the action of the laser beam with different values

E, mJ	T_e, eV	$n_e \times 10^{17}$, cm^{-3}	$f_p \times 10^{12}$, Hz	$\lambda_D \times 10^{-7}$, cm	$N_D \times 10^3$
500	0.187	4.01	5.7	5.1	0.21863
600	0.227	4.24	5.8	5.4	0.28433
700	0.295	5.26	6.5	5.6	0.38020
800	0.434	5.82	6.9	6.4	0.64469
900	0.726	6.13	7.0	8.1	1.35679

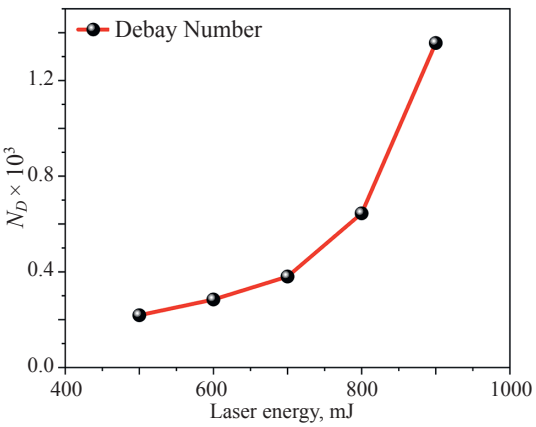


Fig. 8. Debye Number as a function of laser power

on the other hand, the Debye length will gradually decrease, where its value ranges from $5.1 \cdot 10^{-7}$ to $8.1 \cdot 10^{-7}$ cm. This is due to Eqs. (3) and (4), where the frequency corresponds exactly to the electron density, while the Debye length value is inversely proportional to the electron density. These results are consistent with Aadim K.A. et al. [25].

The Debye length increases with increasing laser power. This increase can be explained scientifically by the fact that increasing laser power increases the energy content of the plasma system, leading to the ionization of more atoms and the production of more charged particles. This is also due to the change in the electron density, which increases with increasing energy. Fig. 8 shows the relationship between the Debye length calculated using Eq. (5) and laser power.

Conclusion

This work investigated the effect of laser energy on the behavior of the generated plasma using a locally manufactured aluminum-nickel alloy with a composition ratio of 80:20. The results showed that the spectral emission intensity increased with increasing laser energy. The aluminum emission peak was at a wavelength of 394.6 nm at the energy of 900 mJ, while the nickel emission peak was at 357.7 nm at the same energy. These changes indicate strong interactions between the laser beam energy and the generated plasma, leading to an overall improvement in the plasma properties. Furthermore, a clear increase in both the electron density and electron temperature was observed with increasing laser energy. The highest value of the electron temperature was at 900 mJ, which was equal to 0.726 eV, while the electron density at the same energy was $6.13 \cdot 10^{17}$ cm^{-3}. This is clear evidence that the plasma electrons interact more strongly with the laser energy. The fundamental plasma parameters were also investigated to provide a further understanding of its behavior. These findings support previous studies on the subject and confirm the close relationship between plasma parameters and the applied laser power. Based on these results, we can conclude that there is a close and direct relationship between laser beam energy and plasma composition and characterization. This relationship will open new horizons and better future technologies in many industrial and technological applications and other fields, such as material analysis using Laser-Induced Breakdown Analysis. The current study also contributes to expanding scientific understanding of the mechanism of laser interaction and the effect of laser energy on plasma.

References

1. Abdellatif G., Imam H. A study of the laser plasma parameters at different laser wavelengths. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 2002, vol. 57, no. 7, pp. 1155–1165. https://doi.org/10.1016/S0584-8547(02)00057-5
2. Tchernycheva M.V., Marek V.P., Chirtsov A.S., Shvager D.A. Computational modeling in the study of glow discharge physical processes in the air at low pressures. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2014, vol. 14, no. 3. pp. 140–148. (in Russian)
3. Jawad M.H., Abdulameer M.R. The effect of background argon gas pressure on the parameters of plasma produced by DC-glow discharge. *Iraqi Journal of Science*, 2023, vol. 64, no. 3, pp. 1210–1218. https://doi.org/10.24996/ijs.2023.64.3.17
4. Baskevicius A., Balachninaite O., Karpavicius M., Butkus S., Paipulas D., Sirutkaitis V. Monitoring of the femtosecond laser micromachining process of materials immersed in water by use of

Литература

1. Abdellatif G., Imam H. A study of the laser plasma parameters at different laser wavelengths // Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy. 2002. V. 57. N 7. P. 1155–1165. https://doi.org/10.1016/S0584-8547(02)00057-5
2. Чернышева М.В., Марек В.П., Чирцов А.С., Швагер Д.А. Компьютерное моделирование при изучении физических процессов в тлеющем разряде в воздушной смеси при низких давлениях // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2014. Т. 14, № 3. С. 140–148.
3. Jawad M.H., Abdulameer M.R. The effect of background argon gas pressure on the parameters of plasma produced by DC-glow discharge // Iraqi Journal of Science. 2023. V. 64. N 3. P. 1210–1218. https://doi.org/10.24996/ijs.2023.64.3.17
4. Baskevicius A., Balachninaite O., Karpavicius M., Butkus S., Paipulas D., Sirutkaitis V. Monitoring of the femtosecond laser micromachining process of materials immersed in water by use of

laser-induced breakdown spectroscopy. *Journal of Laser Micro/Nanoengineering*, 2016, vol. 11, no. 3, pp. 381–387. https://doi.org/10.2961/jlmn.2016.03.0018
5. Heidari A.A., Seyfi P., Khademi A., Ghomi H. Investigation of the effects of pulse repetition frequency in a mixed electric field on a SDBD-like plasma jet. *Journal of Theoretical and Applied Physics*, 2022, vol. 16, no. 1, pp. 162208.
6. Veiko V.P., Skvortsov A.M., Tu H.C., Petrov A.A. Laser ablation of monocrystalline silicon under pulsed-frequency fiber laser. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2015, vol. 15, no. 3, pp. 426–434. (in Russian)
7. Aadim K.A. Spectroscopic study the plasma parameters for Pb doped CuO prepared by pulse Nd:YAG laser deposition. *Iraqi Journal of Physics*, 2018, vol. 16, no. 38, pp. 1–9. https://doi.org/10.30723/ijp.v16i38.3
8. Rashid T.M., Rahmah M.I., Mahmood W.K., Fahem M.Q., Jabir M.S., Bidan A.K., Adbalrazaq S., Jawad M.H., Awaid D.M., Qamandar M.A., Alsaffar S.M. Eco-friendly Laser Ablation for Synthesis of CNF@Au Nanoparticles: insights into enhancing NO_2 gas detection and antibacterial activity. *Plasmonics*, 2025, in press. https://doi.org/10.1007/s11468-025-02874-z
9. Gondal M.A., Dastageer M.A. Elemental analysis of soils by laser-induced breakdown spectroscopy. *Springer Series in Optical Sciences*, 2014, vol. 182, pp. 293–308. https://doi.org/10.1007/978-3-642-45085-3_11
10. Jawad M.H., Abdulameer M.R. Study the effect of external voltage on some plasma parameters produced by DC glow xenon gas discharge. *AIP Conference Proceedings*, 2024, vol. 2922, no. 1, pp. 150003. https://doi.org/10.1063/5.0183126
11. Guseva V.E., Nechay A.N., Perekalov A.A., Salashchenko N.N., Chkhalo N.I. Investigation of emission spectra of plasma generated by laser pulses on Xe gas-jet targets. *Applied Physics B*, 2023, vol. 129, no. 10, pp. 155. https://doi.org/10.1007/s00340-023-08095-8
12. Abbas Z.M., Abbas Q.A. Characterization of magnetized-plasma system induced by laser. *Iraqi Journal of Physics*, 2023, vol. 21, no. 4, pp. 45–55. https://doi.org/10.30723/ijp.v21i4.1148
13. Jawad M.H., Assi A.A., Hameed A.M. Hydrothermal synthesis of Zinc Oxide nanostructures using varied reactor designs: a comparative study. *Plasmonics*, 2025, in press. https://doi.org/10.1007/s11468-025-02828
14. Jha V.K., Mishra L.N., Narayan B. Impact of silica seeding and discharge voltage on plasma parameters at atmospheric pressure. *Journal of Theoretical and Applied Physics*, 2022, vol. 16, no. 1, pp. 162205
15. Phillips K.C., Gandhi H.H., Mazur E., Sundaram S.K. Ultrafast laser processing of materials: a review. *Advances in Optics and Photonics*, 2015, vol. 7, no. 4, pp. 684–712. https://doi.org/10.1364/AOP.7.000684
16. Aquino F.W.B., Pereira-Filho E.R. Analysis of the polymeric fractions of scrap from mobile phones using laser-induced breakdown spectroscopy: Chemometric applications for better data interpretation. *Talanta*, 2015, vol. 134, pp. 65–73. https://doi.org/10.1016/j.talanta.2014.10.051
17. Castro J.P., Pereira-Filho E.R. Twelve different types of data normalization for the proposition of classification, univariate and multivariate regression models for the direct analyses of alloys by laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS). *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 2016, vol. 31, no. 10, pp. 2005–2014. https://doi.org/10.1039/C6JA00224B
18. de M. Franco M.A., Milori D.M.B.P., Boas P.R.V. Comparison of algorithms for baseline correction of LIBS spectra for quantifying total carbon in Brazilian soils. *arXiv*, 2018, arXiv:1805.03695. https://doi.org/10.48550/arXiv.1805
19. Fikry M., Tawfik W., Omar M.M. Investigation on the effects of laser parameters on the plasma profile of copper using picosecond laser induced plasma spectroscopy. *Optical and Quantum Electronics*, 2020, vol. 52, no. 5, pp. 249. https://doi.org/10.1007/s11082-020-02381-x
20. Hanif M., Salik M., Baig M.A. Diagnostic study of nickel plasma produced by fundamental (1064 nm) and second harmonics (532 nm) of an Nd: YAG laser. *Journal of Modern Physics*, 2012, vol. 3, no. 10A, pp. 1663–1669. https://doi.org/10.4236/jmp.2012.330203
21. Ahmed N., Ahmed R., Rafiqe M., Baig M.A. A comparative study of Cu–Ni alloy using LIBS, LA-TOF, EDX, and XRF. *Laser and Particle Beams*, 2017, vol. 35, no. 1, pp. 1–9. https://doi.org/10.1017/s0263034616000732

laser-induced breakdown spectroscopy // Journal of Laser Micro/Nanoengineering. 2016. V. 11. N 3. P. 381–387. https://doi.org/10.2961/jlmn.2016.03.0018
5. Heidari A.A., Seyfi P., Khademi A., Ghomi H. Investigation of the effects of pulse repetition frequency in a mixed electric field on a SDBD-like plasma jet // Journal of Theoretical and Applied Physics. 2022. V. 16. N 1. P. 162208.
6. Вейко В.П., Скворцов А.М., Ту Х.К., Петров А.А. Лазерная абляция монокристаллического кремния под действием импульсно-частотного излучения волоконного лазера // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2015. Т. 15. № 3. С. 426–434.
7. Aadim K.A. Spectroscopic study the plasma parameters for Pb doped CuO prepared by pulse Nd:YAG laser deposition // Iraqi Journal of Physics. 2018. V. 16. N 38. P. 1–9. https://doi.org/10.30723/ijp.v16i38.3
8. Rashid T.M., Rahmah M.I., Mahmood W.K., Fahem M.Q., Jabir M.S., Bidan A.K., Adbalrazaq S., Jawad M.H., Awaid D.M., Qamandar M.A., Alsaffar S.M. Eco-friendly Laser Ablation for Synthesis of CNF@Au Nanoparticles: insights into enhancing NO_2 gas detection and antibacterial activity // Plasmonics. 2025. in press. https://doi.org/10.1007/s11468-025-02874-z
9. Gondal M.A., Dastageer M.A. Elemental analysis of soils by laser-induced breakdown spectroscopy // Springer Series in Optical Sciences. 2014. V. 182. P. 293–308. https://doi.org/10.1007/978-3-642-45085-3_11
10. Jawad M.H., Abdulameer M.R. Study the effect of external voltage on some plasma parameters produced by DC glow xenon gas discharge // AIP Conference Proceedings. 2024. V. 2922. N 1. P. 150003. https://doi.org/10.1063/5.0183126
11. Guseva V.E., Nechay A.N., Perekalov A.A., Salashchenko N.N., Chkhalo N.I. Investigation of emission spectra of plasma generated by laser pulses on Xe gas-jet targets // Applied Physics B. 2023. V. 129. N 10. P. 155. https://doi.org/10.1007/s00340-023-08095-8
12. Abbas Z.M., Abbas Q.A. Characterization of magnetized-plasma system induced by laser // Iraqi Journal of Physics. 2023. V. 21. N 4. P. 45–55. https://doi.org/10.30723/ijp.v21i4.1148
13. Jawad M.H., Assi A.A., Hameed A.M. Hydrothermal synthesis of Zinc Oxide nanostructures using varied reactor designs: a comparative study // Plasmonics. 2025. in press. https://doi.org/10.1007/s11468-025-02828-5
14. Jha V.K., Mishra L.N., Narayan B. Impact of silica seeding and discharge voltage on plasma parameters at atmospheric pressure // Journal of Theoretical and Applied Physics. 2022. V. 16. N 1. P. 162205
15. Phillips K.C., Gandhi H.H., Mazur E., Sundaram S.K. Ultrafast laser processing of materials: a review // Advances in Optics and Photonics. 2015. V. 7. N 4. P. 684–712. https://doi.org/10.1364/AOP.7.000684
16. Aquino F.W.B., Pereira-Filho E.R. Analysis of the polymeric fractions of scrap from mobile phones using laser-induced breakdown spectroscopy: Chemometric applications for better data interpretation // Talanta. 2015. V. 134. P. 65–73. https://doi.org/10.1016/j.talanta.2014.10.051
17. Castro J.P., Pereira-Filho E.R. Twelve different types of data normalization for the proposition of classification, univariate and multivariate regression models for the direct analyses of alloys by laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS) // Journal of Analytical Atomic Spectrometry. 2016. V. 31. N 10. P. 2005–2014. https://doi.org/10.1039/C6JA00224B
18. de M. Franco M.A., Milori D.M.B.P., Boas P.R.V. Comparison of algorithms for baseline correction of LIBS spectra for quantifying total carbon in Brazilian soils // arXiv. 2018. arXiv:1805.03695. https://doi.org/10.48550/arXiv.1805
19. Fikry M., Tawfik W., Omar M.M. Investigation on the effects of laser parameters on the plasma profile of copper using picosecond laser induced plasma spectroscopy // Optical and Quantum Electronics. 2020. V. 52. N 5. P. 249. https://doi.org/10.1007/s11082-020-02381-x
20. Hanif M., Salik M., Baig M.A. Diagnostic study of nickel plasma produced by fundamental (1064 nm) and second harmonics (532 nm) of an Nd:YAG laser // Journal of Modern Physics. 2012. V. 3. N 10A. P. 1663–1669. https://doi.org/10.4236/jmp.2012.330203
21. Ahmed N., Ahmed R., Rafiqe M., Baig M.A. A comparative study of Cu–Ni alloy using LIBS, LA-TOF, EDX, and XRF // Laser and Particle Beams. 2017. V. 35. N1. P. 1–9. https://doi.org/10.1017/s0263034616000732

22. Lober R., Mazumder J. Spectroscopic diagnostics of plasma during laser processing of aluminium. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2007, vol. 40, no. 19, pp. 5917. https://doi.org/10.1088/0022-3727/40/19/021
23. Shehab M.M., Aadim K.A. Spectroscopic diagnosis of the CdO: CoO plasma produced by Nd:YAG laser. *Iraqi Journal of Science*, 2021, vol. 62, no. 9, pp. 2948–2955. https://doi.org/10.24996/ijs.2021.62.9.11
24. Kison V.E., Mustafaev A.S., Sukhomlinov V.S. Development of a new plasma technology for producing pure white corundum. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2021, vol. 21, no. 3, pp. 380–385. (in Russian). https://doi.org/10.17586/2226-1494-2021-21-3-380-385
25. Aadim K.A., Ahmed B.M., Khalaf M.A. Influence of Sn doping ratio on the structural and optical properties of CdO films prepared by laser induced plasma. *Iraqi Journal of Physics*, 2020, vol. 18, no. 45, pp. 1–8. https://doi.org/10.30723/ijp.v18i45.523

22. Lober R., Mazumder J. Spectroscopic diagnostics of plasma during laser processing of aluminium // Journal of Physics D: Applied Physics. 2007. V. 40. N 19. P. 5917. https://doi.org/10.1088/0022-3727/40/19/021
23. Shehab M.M., Aadim K.A. Spectroscopic diagnosis of the CdO: CoO plasma produced by Nd:YAG laser // Iraqi Journal of Science. 2021. V. 62. N 9. P. 2948–2955. https://doi.org/10.24996/ijs.2021.62.9.11
24. Кисон В.Э., Мустафаев А.С., Сухомлинов В.С. Разработка новой плазменной технологии получения чистого белого корунда // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2021. Т. 21. № 3. С. 380–385. https://doi.org/10.17586/2226-1494-2021-21-3-380-385
25. Aadim K.A., Ahmed B.M., Khalaf M.A. Influence of Sn doping ratio on the structural and optical properties of CdO films prepared by laser induced plasma // Iraqi Journal of Physics. 2020. V. 18. N 45. P. 1–8. https://doi.org/10.30723/ijp.v18i45.523

Authors

Mohammed Hamza Jawad — PhD Student, University of Baghdad, Baghdad, 00964, Iraq, SC 58536603200, https://orcid.org/0009-0001-8111-8195, mohammed.hamza1204a@sc.uobaghdad.edu.iq
Mohammed Ridha Abdulameer — PhD, Professor, University of Baghdad, Baghdad, 00964, Iraq, SC 56971327800, https://orcid.org/0000-0002-7395-9840, mohammed_plasma@sc.uobaghdad.edu.iq
Kadhim Abdulwahid Aadim — PhD, Professor, University of Baghdad, Baghdad, 00964, Iraq, SC 56728936300, https://orcid.org/0000-0003-4533-5309, kadhim.aadim@ilps.uobaghdad.edu.iq

Авторы

Джавад Мохаммед Хамза — аспирант, Университет Багдада, Багдад, 00964, Ирак, SC 58536603200, https://orcid.org/0009-0001-8111-8195, mohammed.hamza1204a@sc.uobaghdad.edu.iq
Абдуламир Мохаммед Ридха — PhD, профессор, Университет Багдада, Багдад, 00964, Ирак, SC 56971327800, https://orcid.org/0000-0002-7395-9840, Mohammed_plasma@sc.uobaghdad.edu.iq
Аадим Кадхим Абдулвахид — PhD, профессор, Университет Багдада, Багдад, 00964, Ирак, SC 56728936300, https://orcid.org/0000-0003-4533-5309, kadhim.aadim@ilps.uobaghdad.edu.iq

Received 18.03.2025
Approved after reviewing 21.06.2025
Accepted 23.07.2025

Статья поступила в редакцию 18.03.2025
Одобрена после рецензирования 21.06.2025
Принята к печати 23.07.2025

Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ
июль–август 2025 Том 25 № 4 http://ntv.ifmo.ru/
SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL OF INFORMATION TECHNOLOGIES, MECHANICS AND OPTICS
Jule–August 2025 Vol. 25 No 4 http://ntv.ifmo.ru/en/
ISSN 2226-1494 (print) ISSN 2500-0373 (online)

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ

doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-4-635-642
УДК 681.786

Применение анаморфотной оптической системы и высокоскоростного линейного фотоприемника в инкрементном преобразователе перемещений открытого типа

Владимир Николаевич Кузнецов[1]✉, Аюр Тумэнович Гармаев[2], Иван Геннадьевич Дейнека[3], Александр Сергеевич Васильев[4], Кирилл Александрович Глазунов[5]

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

[1] vnkuznetcov@itmo.ru✉, https://orcid.org/0000-0001-7565-2466
[2] a_garmayev@list.ru, https://orcid.org/0009-0005-2977-5840
[3] igdeyneka@itmo.ru, https://orcid.org/0000-0003-1557-8035
[4] a_s_vasilev@itmo.ru, https://orcid.org/0000-0002-2080-3252
[5] k1ria@live.ru, https://orcid.org/0009-0002-6645-2432

Аннотация

Введение. Оптико-оэлектронные преобразователи перемещений на базе изображающих оптических систем и двумерных матриц характеризуются широкими возможностями по снижению погрешности измерений за счет применения современных алгоритмов обработки изображений. Однако применение двумерных матриц в составе преобразователей перемещений приводит к значительному снижению частоты обновления позиции. Это ограничивает применение таких устройств в промышленности. В данной работе представлен вариант оптико-электронного преобразователя перемещений с применением высокоскоростного линейного фотоприемника и анаморфотной оптической системы на основе цилиндрической линзы, позволяющий увеличить частоту определения позиции и снизить погрешность ее определения. **Метод.** В качестве кодирующей структуры применена лента RTLC40 фирмы Renishaw с периодом следования штрихов 40 мкм, погрешностью изготовления 5 мкм/м и протяженностью 300 мм. Макет оптико-оэлектронного преобразователя перемещений реализован на базе рассчитанного и изготовленного объектива (линейное поле в пространстве предметов 0,84 мм, увеличение 10×). В макете применены цилиндрическая линза, линейный фотоприемник GL3504-BVM-NCN-AU1 и программируемая логическая интегральная схема 5CEFA9F23. Вычисление перемещения объекта измерений, на который устанавливается кодирующая структура, основано на определении энергетического центра изображения штрихов. Исследование погрешности представленного макета преобразователя перемещений осуществлялось с помощью интерферометра XD6 LS, моторизированного линейного транслятора LTS300/M. Частота обновления позиции измерена с помощью осциллографа MSO5074. **Основные результаты.** Применение цилиндрической линзы в составе объектива позволило увеличить облученность фотоприемника в три раза. Экспериментально определены частота обновления позиции и случайная составляющая погрешности исследуемого оптико-электронного преобразователя перемещений, составившие 10 кГц и 0,94 мкм на участке 290 мм соответственно. **Обсуждение.** Предлагаемая конструкция оптико-электронного преобразователя перемещений может быть рекомендована при проектировании преобразователей перемещений с применением оптических систем на основе цилиндрических линз. Для вычисления перемещений периодических структур рекомендованы программируемые логические интегральные схемы. Полученные результаты могут быть полезны специалистам, работающим в области разработки прецизионного оборудования измерения перемещений в станкостроении.

Ключевые слова

оптико-электронные преобразователи перемещений, оптические измерения, измерения перемещений, датчик линейных перемещений, линейный фотоприемник, цилиндрическая линза

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 23-91-06503.

Ссылка для цитирования: Кузнецов В.Н., Гармаев А.Т., Дейнека И.Г., Васильев А.С., Глазунов К.А. Применение анаморфотной оптической системы и высокоскоростного линейного фотоприемника в инкрементном преобразователе перемещений открытого типа // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2025. Т. 25, № 4. С. 635–642. doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-4-635-642

© Кузнецов В.Н., Гармаев А.Т., Дейнека И.Г., Васильев А.С., Глазунов К.А., 2025

Application of anamorphic optics system and a high-speed line scan photodetector in an open-type relative encoder

Vladimir N. Kuznetsov[1]✉, Ayur T. Garmaev[2], Ivan G. Deyneka[3], Aleksandr S. Vasilev[4], Kirill A. Glazunov[5]

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

[1] vnkuznetcov@itmo.ru✉, https://orcid.org/0000-0001-7565-2466
[2] a_garmayev@list.ru, https://orcid.org/0009-0005-2977-5840
[3] igdeyneka@itmo.ru, https://orcid.org/0000-0003-1557-8035
[4] a_s_vasilev@itmo.ru, https://orcid.org/0000-0002-2080-3252
[5] k1ria@live.ru, https://orcid.org/0009-0002-6645-2432

Abstract

Optical encoders based on imaging optical systems and two-dimensional sensor arrays have shown substantial potential for reducing measurement errors through the use of modern image processing algorithms. However, the application of two-dimensional photodiode array in optical encoders significantly reduces the update rate of positional data. This limitation is critical for wide industrial application. This study presents an optical encoder design that incorporates a high-speed linear photodiode array and an anamorphic optical system utilizing a cylindrical lens, allowing for increased update rates and reduced positional error. A Renishaw RTLC40 tape, with a grating period of 40 μm, fabrication accuracy of ±5 μm/m, and a length of 300 mm, was employed as the encoding structure. The prototype optical encoder was developed using a GL3504-BVM-NCN-AU1 linear photodetector array, a custom designed and manufactured objective (linear field in object plane of 0,84 mm, magnification 10×) with an integrated cylindrical lens and 5CEFA9F23 programmable logic device. The calculation of the object displacement is based on determining the energy centroid of the images of grating scale, which tightly mounted on the object. The error analysis of the proposed encoder prototype was determined using an XD6 LS interferometer and an LTS300/M motorized stage. Positional update frequency was measured with an MSO5074 oscilloscope. The use of a cylindrical lens amplified the irradiance projected onto the photodetector array, achieving a maximum gain factor of three. Update frequency and measurement error of the proposed optical encoder were experimentally determined and equals 10 kHz and 0,94 μm over 290 mm range, respectively. The proposed design of the optical encoder can be used as a recommendation for the development of encoders that employ cylindrical lens-based optical systems. Field-programmable gate array is recommended for grating scale displacement computation. The results obtained may prove valuable for specialists in precision displacement measurement and machine tool construction.

Keywords

optical encoder, displacement measurements, linear position sensor, line scan photodetector, cylindrical lens

Acknowledgements

The research was carried out by the expense of the Russian Science Foundation grant (project No. 23-91-06503).

For citation: Kuznetsov V.N., Garmaev A.T., Deyneka I.G., Vasilev A.S., Glazunov K.A. Application of anamorphic optics system and a high-speed line scan photodetector in an open-type relative encoder. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2025, vol. 25, no. 4, pp. 635–642 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-4-635-642

Введение

Преобразователи перемещений — класс устройств, предназначенных для определения положения узлов машин и механизмов в пространстве и передачи вычисленной позиции на управляющую электронику. Среди существующих типов преобразователей перемещений (емкостных, индуктивных, потенциометрических и других, согласно классификации в ГОСТ 26242-90[1]) оптико-электронные преобразователи перемещений характеризуются наилучшим соотношением между показателями погрешности, разрешения, диапазона перемещений и частоты обновления позиции [1].

Благодаря компактному исполнению и простоте установки (по сравнению с интерферометрами), оптоэлектронные преобразователи перемещений нашли широкое применение в области прецизионного станкостроения, приборостроения и автоматизации промышленных процессов [2, 3]. Теоретические характеристики оптико-электронных преобразователей перемещений могут достигать 6–10 нм по параметру разрешения, и погрешностью определения позиции ±1 мкм/м.

Оптические системы преобразователей перемещений можно разделить на проекционные системы [4], системы на основе интерференции дифракционных порядков в ближней зоне дифракции [5], а также интерферометрические с возникновением однократного или многократного разложения оптического излучения по дифракционным порядкам [6, 7]. Оптико-электронные преобразователи перемещений, основанные на явлениях дифракции и интерференции оптического излучения, получили широкое распространение благодаря малому размеру, высокой устойчивости к электромагнитным помехам и малой чувствительности к загрязнениям измерительных шкал [8]. Одним из основных недостатков таких преобразователей перемещений является их высокая чувствительность к колебаниям температуры и влажности в среде распространения излучения. При этом погрешность измерений может возрастать вплоть до сотен микрометров. Датчики на основе изображающих оптических систем характеризуются более выра-

[1] ГОСТ 26242-90. Системы числового программного управления. Преобразователи перемещений. Общие технические условия. Введ. 01.01.91. М.: Изд-во стандартов, 1990. 14 с.

женной устойчивостью к вариациям параметров среды распространения [9]. Благодаря непосредственному проецированию изображения на фотоприемное устройство, появляется возможность определять перемещение кодирующих структур (КС), которые могут отличаться по профилю, геометрическим размерам и периоду следования штрихов.

Пример конструкции преобразователя перемещений с применением оптической системы на основе линз представлен в работах [10, 11]. В настоящей работе предложено устройство, в состав которого входит магнитный датчик для грубого (с погрешностью ±0,5 мм) определения абсолютного положения и оптико-электронный преобразователь для точного определения относительного смещения. Для определения относительного перемещения был использован алгоритм на основе вычисления энергетического центра. Погрешность измерения после введения компенсации систематической составляющей не превысила 1,65 мкм по трем значениям среднеквадратического отклонения.

Одним из направлений дальнейшего развития тематики оптико-электронных преобразователей перемещений на базе изображающих оптических систем является увеличение частоты определения положения объекта измерений путем применения линейных фотоприемников и оптической системы на основе цилиндрической линзы.

Линейные фотоприемники по своему внутреннему устройству и принципу фотоэлектрического преобразования похожи на матричные фотоприемники [12]. Их отличием является использование в качестве фоточувствительной области одной или нескольких строк пикселов. Благодаря сокращению количества строк возрастает максимальная кадровая частота (до сотен тысяч кадров в секунду). С другой стороны, работа с одномерным сигналом не позволяет снизить влияние загрязнений и повреждений измерительной шкалы и увеличить отношение сигнал-шум изображения штрихов за счет суммирования регистрируемого пикселами сигнала по столбцам. Возрастание отношения сигнал-шум в случае применения линейного фотоприемника ограничивается (при прочих равных условиях) увеличением времени экспозиции, что может привести к снижению максимальной кадровой частоты, и, вместе с этим, к снижению частоты обновления измеряемой позиции. Для обеспечения высокой кадровой частоты и устойчивости к дефектам и пятнам на измерительной шкале предлагается анаморфотная оптическая система на основе цилиндрической линзы.

Принцип работы предлагаемого оптико-электронного преобразователя перемещений

Структурная схема предлагаемого оптико-электронного преобразователя перемещений представлена на рис. 1.

Оптическое излучение от источника излучения отклоняется светоделительным кубом на 90°. Преломленное оптическое излучение падает на КС, жестко закрепленную на объекте измерений. Отраженное

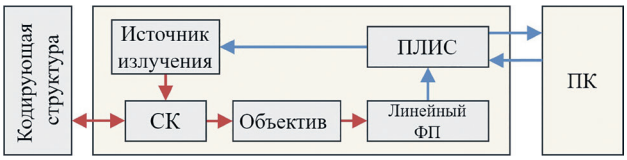


Рис. 1. Структура оптико-электронного преобразователя перемещений на базе изображающей оптической системы.

СК — светоделительный куб; ПЛИС — программируемая логическая интегральная схема; ФП — фотоприемник; ПК — персональный компьютер

Fig. 1. Structural diagram of optical encoder based on imaging optical systems.

СК — beam-splitting cube; ПЛИС — field-programmable gate array; ФП — photodetector; ПК — personal computer

от КС оптическое излучение вновь проходит светоделительный куб и попадает в объектив. Объектив формирует оптическое изображение штрихов КС на поверхности линейного фотоприемника с 10× увеличением и преломлением в меридиональной плоскости за счет цилиндрической линзы. Фотоприемник преобразует оптическое излучение в электрический сигнал с последующим преобразованием в цифровой код. Оцифрованный сигнал передается на ПЛИС, в которой реализуется алгоритм вычисления положения объекта измерений, основанный на определении перемещения КС. При изменении положения объекта измерений (и, следовательно, КС) соответствующим образом перемещается изображение штрихов. По разности между текущим и предыдущим положениями штриха определяется перемещение КС, и, соответственно, положение объекта измерений. Вычисленное положение объекта измерений в виде цифрового значения передается на персональный компьютер или управляющую электронику в составе станка.

Оптическая система в составе предлагаемого оптико-электронного преобразователя перемещений спроектирована в виде телецентрической системы. Данное решение обусловлено тем, что для обработки изображения и вычисления результирующего смещения важно обеспечить минимальные отклонения периода и ширины штрихов. Телецентрическая система обеспечивает постоянный коэффициент увеличения оптической системы, не зависящий от расстояния между объективом и КС. Подробнее описанный объектив рассматривается в [13], его оптическая схема представлена на рис. 2.

Светоделительный куб *1* используется для освещения шкалы под прямым углом. Расчет параметров склеек *2* и *3* осуществлялся исходя из соображений уменьшения влияния аберраций 3-го порядка на длине волны 635 нм и оптимального соотношения коэффициента увеличения и габаритного размера объектива. Длина волны была выбрана в соответствии с полученным расчетным значением оптимальной длины волны источника излучения для выбранного фотоприемника.

Целью использования цилиндрической линзы *4* в составе оптической системы является увеличение облученности на чувствительной площадке фотоприемника. За счет преломления оптического излучения в меридиональной плоскости и отсутствия преломления

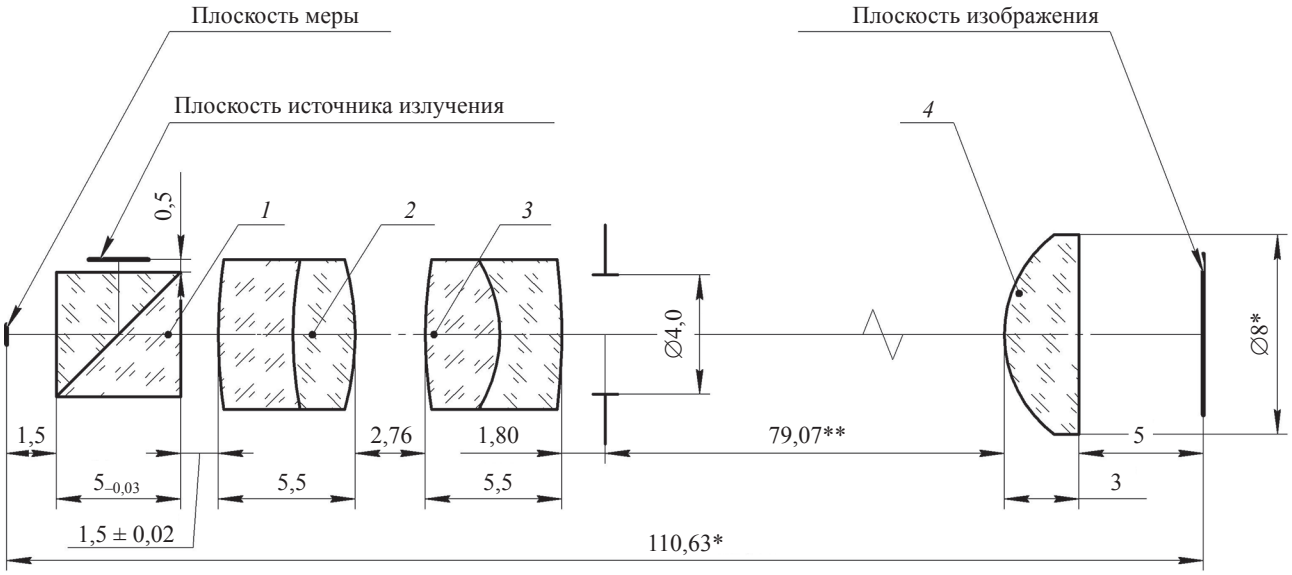


Рис. 2. Предлагаемая оптическая схема оптико-электронного преобразователя перемещений, вид для меридиональной плоскости: *1* — светоделительный куб; *2* и *3* — склейки; *4* — цилиндрическая линза.

* — размер для справок, ** — расчетный размер (при сборке объектива может быть скорректирован исходя из размеров линз с учетом погрешности изготовления)

Fig. 2. Proposed optical scheme of encoder, view for the meridional plane: *1* — beam-splitting cube; *2* and *3* — lens assembly; *4* — cylindrical lens.

* — reference dimension, ** — estimated dimension (can be adjusted during objective assembly based on the final lens dimensions)

в сагиттальной происходит концентрация оптического излучения в плоскости изображений. Моделирование хода лучей в геометрическом приближении, осуществляемое объективом, было проведено в программе ANSYS Zemax OpticStudio 2024.

На рис. 3 приведено сравнение изображений штрихов КС в плоскости детектирования, расположенной на первой поверхности цилиндрической линзы *4* (рис. 2) по ходу оптического луча, и в плоскости изображения оптической системы.

Как видно на рис. 3, применение цилиндрической линзы позволяет увеличить приходящую на линейный фотоприемник облученность до трех раз по сравнению с регистрацией изображения без нее.

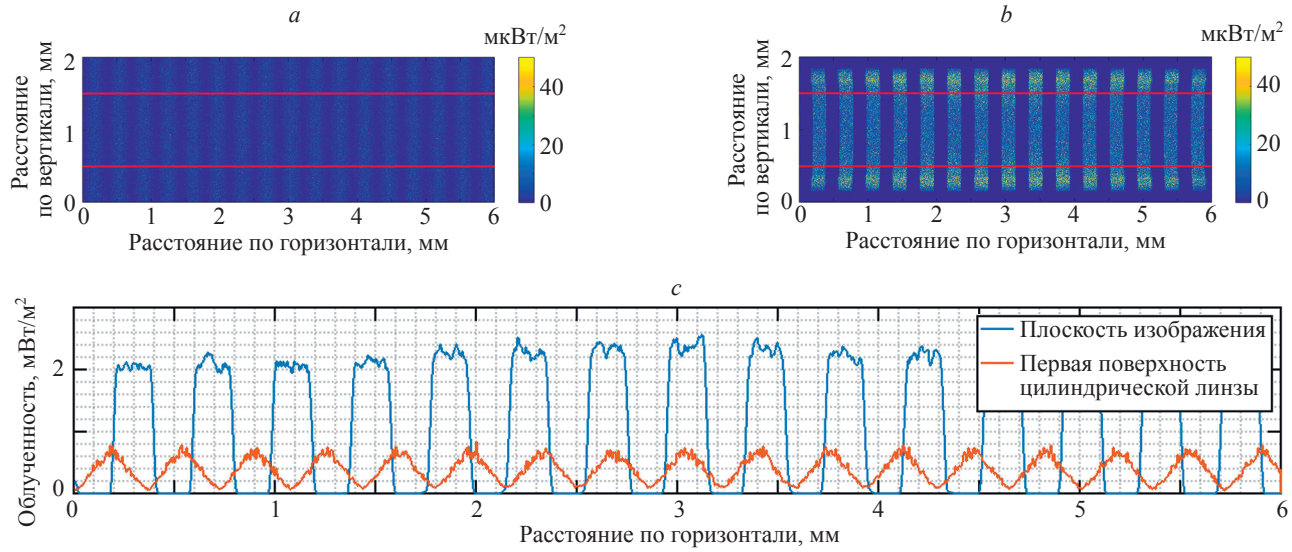


Рис. 3. Распределения облученности для первой поверхности цилиндрической линзы по ходу оптического луча (*a*) и на плоскости изображения (*b*). Сравнение значений облученности (рис. 3, *a*, *b*), полученных путем суммирования по вертикали (*c*).

Линиями красного цвета на рис. 3, *a* и *b* обозначен интервал суммирования значений облученности

Fig. 3. Irradiance distribution for the first surface of a cylindrical lens along the optical beam (*a*) and on the image plane (*b*). Comparison of irradiance values (Fig. 3, *a*, *b*), calculated by summation along vertical axis (*c*).

The red lines in Fig. 3, *a* and *b* mark the interval of summation of irradiance values

Линейный фотоприемник используется для преобразования оптического излучения в электрический сигнал. Существующие на данный момент линейные фотоприемники отличаются как по параметрам фоточувствительных элементов (размеры и количество пикселов, спектральная чувствительность, неоднородность фоточувствительности и другие), так и по способу передачи данных (регистр переноса заряда, полностью цифровой выход в виде параллельной или последовательной шины передачи) [14]. Одной из передовых фирм, разрабатывающих высокоскоростные линейные фотоприемники, является компания Gpixel (Китай). Линейный фотоприемник GL3504-BVM-NCN-AU1 выделяется среди аналогов других фирм (Hamamatsu, Toshiba, AMS-OSRAM) по совокупному соотношению таких параметров, как частота строк (до 172 тыс. строк в секунду), размеры пикселов и их количество (длина пиксела 7 мкм, ширина пиксела 7 мкм, 2048 штук), а также динамический диапазон (65,5 дБ) и отношение сигнал-шум (39,7 дБ).

Для определения перемещения был разработан алгоритм, в основе которого лежит вычисление энергетического центра. Для обнаружения штрихов используется принцип порогового детектирования. В качестве входных данных для алгоритма выступает принятый с линейного фотоприемника одномерный кадр. Осуществляется поиск области однократного пересечения порогового значения. Пороговое значение определяется как 70 % от максимального значения сигнала. По значениям в этой области вычисляется координата энергетического центра. Так, в разрабатываемом оптико-электронном преобразователе перемещений координатой энергетического центра является средневзвешенное значение сигнала на детектируемом штрихе, определяемое с помощью выражения:

$$x_j^{encent} = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_{j,i} U_{j,i}}{\sum_{i=1}^{n} U_{j,i}}, \qquad (1)$$

где x_j^{encent} — координата энергетического центра штриха, находящегося в центральной области линейного фотоприемника j-го кадра, номер пиксела; $x_{j,i}$ — координата i-го пиксела j-го кадра, номер пиксела; $U_{j,i}$ — значение сигнала с i-го пиксела на j-ом кадре, относительные единицы; n — количество пикселов внутри области работы алгоритма, $i = 1, \ldots, n, j \in \mathbb{N}$.

После определения координат энергетических центров по формуле (1) оценивается разность координат энергетических центров штриха на текущем кадре и предыдущем кадре, таким образом вычисляется перемещение, осуществленное между двумя кадрами.

С точки зрения обработки, на линейном фотоприемнике определяется несколько областей опроса, каждая с шириной, равной периоду КС после преобразования оптической системой. Это позволяет определять координату одного энергетического центра в каждый момент времени и фиксировать его появление/выход из области опроса. Таким образом, при линейном перемещении зависимость координаты энергетического центра от времени будет равна текущей фазе сигнала с точностью до константного множителя. Добавляя счетчик перепадов фазы, текущее значение перемещения можно вычислить с помощью выражения:

$$x_{\text{энк}} = x_j^{encent} k + PN, \qquad (2)$$

где $x_{\text{энк}}$ — текущее значение положения объекта измерений, мкм; k — масштабный коэффициент, мкм/пиксел; N — количество пройденных периодов; P — период КС, мкм.

Представленный в формуле (2) масштабный коэффициент определяется как отношение количества пикселов, приходящихся на один период изображения штриха, к периоду КС. Вычисление положения оптико-электронного преобразователя перемещений по формуле (2) для нескольких областей опроса одновременно позволяет увеличить надежность измерений.

Исследование предлагаемого преобразователя

Описание исследуемого макета. В качестве КС (рис. 1) была применена измерительная шкала RTLC40 (фирма Renishaw, Великобритания). Период штрихов данной шкалы составляет 40 мкм, длина шкалы – 300 мм. Измерительная шкала прикреплена к объекту измерения. Источник излучения представляет собой светодиод с диаметром линзы 3 мм, максимальной силой света 3 кд, пиковой длиной волны 635 нм и углом излучения 30°. Излучение направлено на светоделительный куб Edmund Optics (длина ребер 5 мм). Оптическое излучение, проходя через куб, попадает на измерительную шкалу и отражается от нанесенных на нее штрихов. Отраженное излучение далее снова проходит через светоделительный куб и попадает в объектив с увеличением $10^{\times}$ и цилиндрической линзой, преломляющей излучение в меридиональной плоскости. Изображение, построенное объективом, оцифровывается фотоприемником GL3504-BVM-NCN-AU1 и передается на ПЛИС 5CEFA9F23 в составе отладочной платы BeMicro CV A9. Цифровая схема, реализованная на ПЛИС, осуществляет обработку изображения с применением алгоритма вычисления энергетического центра и передает результирующую позицию на персональный компьютер по интерфейсу Ethernet.

Результаты эксперимента. На рис. 4 представлен внешний вид измерительного стенда, собранного для исследования параметров макета инкрементного преобразователя перемещений.

Положение узлов преобразователя перемещений корректировалось с помощью трех микропозиционеров. В качестве эталонного средства измерений был использован интерферометр XD6 LS, характеризующийся рабочим диапазоном 0–45 м и погрешностью измерений в 0,5 мкм/м. Отражатель интерферометра, а также КС RTLC40 закреплены на подвижной платформе моторизированного линейного транслятора LTS300/M. Макет преобразователя перемещений, интерферометр и линейный транслятор были подключены к персональному компьютеру для проведения измерений в автоматизированном режиме.

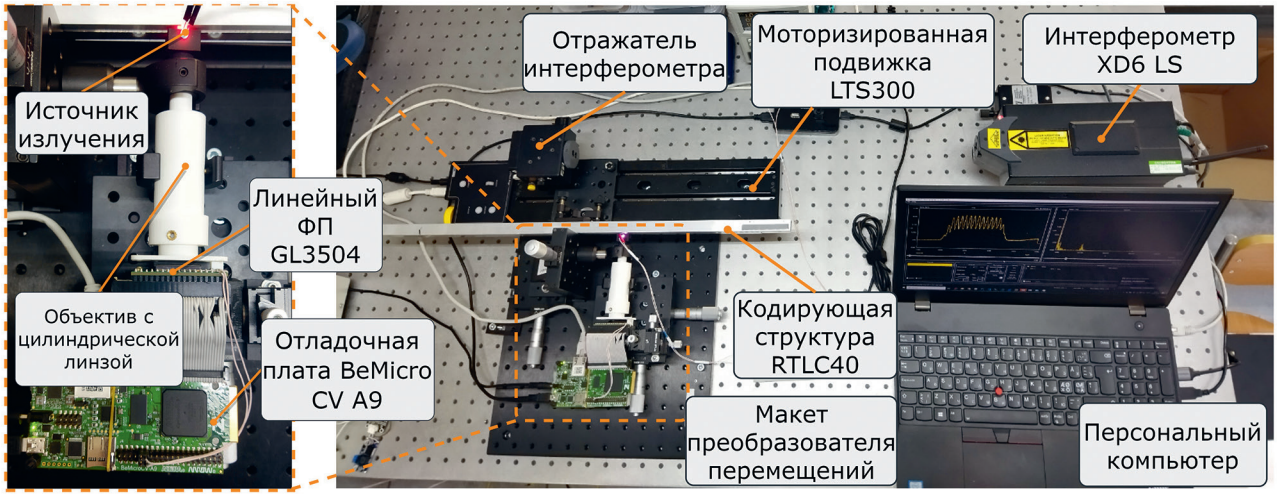


Рис. 4. Стенд для проведения исследований макета преобразователя перемещений

Fig. 4. Laboratory test setup for optical encoder prototype evaluation

Методика проведения эксперимента заключается в следующем. Первым шагом является передвижение платформы линейного транслятора LTS300/M к краю КС. Далее производится настройка параметров движения платформы (скорость 0,4 мм/с, ускорение 10 мм/с^2, шаг перемещения линейного транслятора 0,1 мм) линейного транслятора. Осуществляется сброс положения, фиксируемого интерферометром XD6 LS. Запускается процесс получения позиции, фиксируемого измерительной головкой макета инкрементного преобразователя, и положения, измеренного интерферометром. После каждого шага перемещения платформы линейного транслятора происходит однократная запись показаний, измеренных макетом и интерферометром. Затем платформа пошагово перемещается в прямом направлении движения, и возвращается в исходную позицию. В рамках эксперимента было проведено три серии измерений, диапазон измерений составил 290 мм. Для каждой серии измерений была вычислена абсолютная погрешность измерений (мкм) по выражению:

$$\Delta = x_{\text{энк}} - x_{\text{инт}}, \qquad (3)$$

где $x_{\text{энк}}$ и $x_{\text{инт}}$ — значения положений объекта измерений, определенные макетом преобразователя перемещений по формуле (2) и интерферометром.

Вычисленная по формуле (3) погрешность измерений представлена на рис. 5.

Погрешность измерений без дополнительной калибровки преобразователя перемещений составила 8 мкм. На графиках наблюдается систематическая составляющая погрешности, которая может быть вызвана несовершенством механической части моторизированного линейного транслятора (что вызывает изменение положения отражателя интерферометра при движении платформы), отклонениями положения шкалы, а также погрешностью изготовления КС. Поскольку систематическую составляющую погрешности можно исключить путем введения калибровочных зависимостей, важно определить значение случайной составляющей погрешности. Исключив систематическую составляющую погрешности по методу, описанному в [15] без отдельного рассмотрения обратного хода, остается случайная составляющая погрешности, представленная на рис. 6 (отсчеты серий измерений объединены).

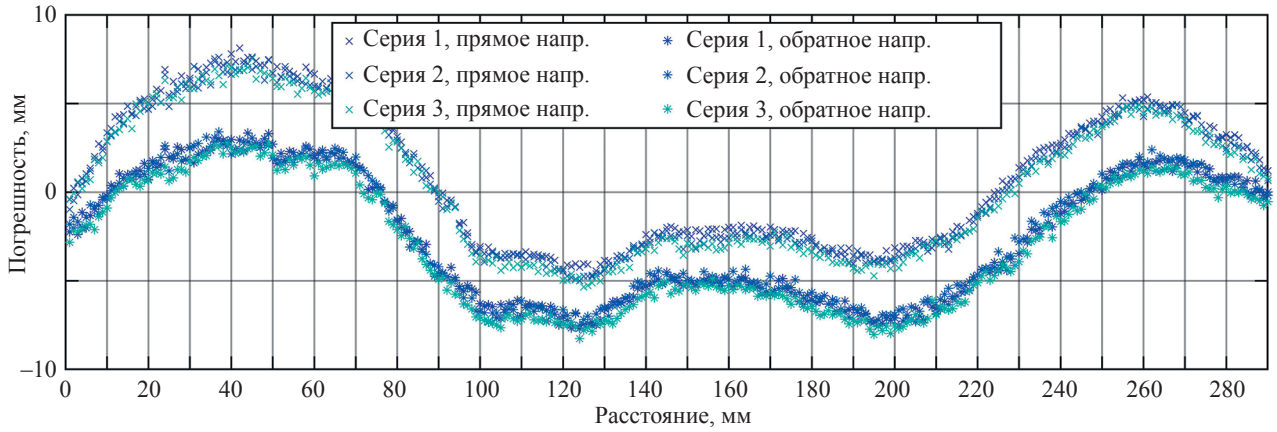


Рис. 5. Погрешность измерений для трех серий экспериментов

Fig. 5. Absolute error of position measurement for three series of experiments

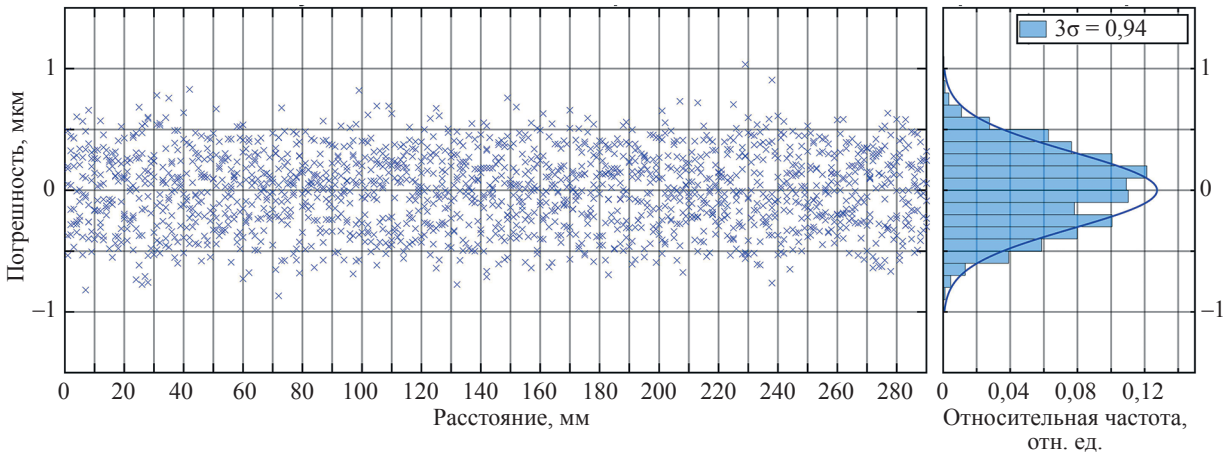


Рис. 6. Случайная составляющая погрешности, объединенная для трех серий экспериментов

Fig. 6. Random error (deviations) of position measurement for three series of experiments

Значения математического ожидания трех серий измерений в прямом направлении составили 0,28 мкм, –0,01 мкм и –0,27 мкм, в обратном –0,15 мкм, 0,21 мкм и –0,35 мкм. Погрешность позиционирования, определяемая как три значения среднеквадратических отклонений, в прямом направлении движения составила 0,55 мкм, 0,56 мкм и 0,57 мкм, в обратном направлении – 0,70 мкм, 0,68 мкм и 0,58 мкм соответственно. Значение трех объединенных среднеквадратических отклонений (3σ) случайной составляющей погрешности составило 0,94 мкм.

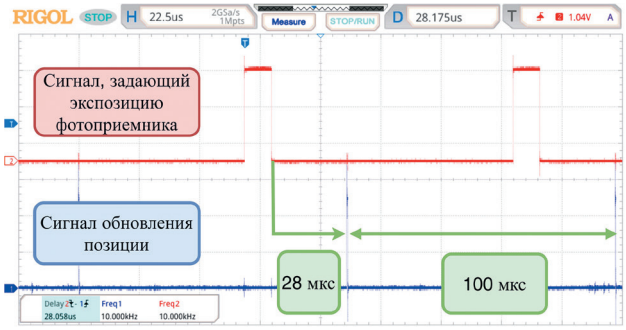


Рис. 7. Осциллограмма сигналов экспозиции для матрицы GL3504-BVM-NCN-AU1 и обновления позиции

Fig. 7. Oscillogram of exposure signal for GL3504-BVM-NCN-AU1 and position update signal

Для измерения значений частоты на выходе системы был использован осциллограф Rigol MSO5074. Результаты представлены на рис. 7.

Период следования сигналов обновления позиции составил 100 мкс, что соответствует частоте 10 кГц. Время вычисления позиции относительно окончания экспонирования на линейном фотоприемнике составило 28 мкс.

Заключение

В работе представлен инкрементный оптико-электронный преобразователь перемещений открытого типа с применением высокоскоростного линейного фотоприемника и объектива на базе цилиндрической линзы. Результатом практической реализации предлагаемых способов повышения быстродействия и снижения случайной составляющей погрешности определения позиции объекта измерений стал действующий макет оптико-электронного преобразователя перемещений. Макет построен с использованием матрицы GL3504-BVM-NCN-AU1 и объектива на основе анаморфотной оптической системы с применением цилиндрической линзы. Частота обновления позиции составила 10 кГц, максимальное значение погрешности позиционирования, определяемое по трем значениям среднеквадратических отклонений, составило 0,94 мкм на диапазоне перемещений 290 мм.

Литература

1. Fleming A.J. A review of nanometer resolution position sensors: Operation and performance // Sensors and Actuators A: Physical. 2013. V. 190. P. 106–126. https://doi.org/10.1016/j.sna.2012.10.016
2. Коротаев В.В., Прокофьев А.В., Тимофеев А.Н. Оптико-электронные преобразователи линейных и угловых перемещений. Ч. I. Оптико-электронные преобразователи линейных перемещений: Учеб. пособие. СПб.: НИУ ИТМО, 2012. 116 с.
3. Shimizu Y., Chen L., Kim D., Chen X., Li X., Matsukuma H. An insight into optical metrology in manufacturing // Measurement Science and Technology. 2021. V. 32. N 4. P. 042003. https://doi.org/10.1088/1361-6501/abc578

References

1. Fleming A.J. A review of nanometer resolution position sensors: Operation and performance. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2013, vol. 190, pp. 106–126. https://doi.org/10.1016/j.sna.2012.10.016
2. Korotaev V.V., Prokofev A.V., Timofeev A.N. *Optoelectronic Transducers of Linear and Angular Displacements*. Part 1. *Optoelectronic Transducers of Linear Displacements*. St. Petersburg, NIU ITMO, 2012, 116 p. (in Russian)
3. Shimizu Y., Chen L., Kim D., Chen X., Li X., Matsukuma H. An insight into optical metrology in manufacturing. *Measurement Science and Technology*, 2021, vol. 32, no. 4, pp. 042003. https://doi.org/10.1088/1361-6501/abc578

4. Cosijns S.J.A.G., Jansen M.J., Haitjema H. Advanced optical incremental sensors: encoders and interferometers // Smart sensors and MEMS: Intelligent Sensing Devices and Microsystems for Industrial Applications. Second Edition. 2018. P. 245–290. https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102055-5.00010-3
5. Ye G, Liu H., Fan S., Li X., Yu H., Lei B., Shi Y., Yin L., Lu B. A theoretical investigation of generalized grating imaging and its application to optical encoders // Optics Communications. 2015. V. 354. P. 21–27. https://doi.org/10.1016/j.optcom.2015.05.023
6. Luo L., Shan S., Li X. A review: laser interference lithography for diffraction gratings and their applications in encoders and spectrometers // Sensors. 2024. V. 24. N 20. P. 6617. https://doi.org/10.3390/s24206617
7. Ye G., Liu H., Lei B., Niu D., Xing H., Wei P., Lu B., Liu H. Optimal design of a reflective diffraction grating scale with sine-trapezoidal groove for interferential optical encoders // Optics and Lasers in Engineering. 2020. V. 134. P. 106196. https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2020.106196
8. Yu H., Chen X., Liu C., Cai G., Wang W. A survey on the grating based optical position encoder // Optics and Laser Technology. 2021. V. 143. P. 107352. https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2021.107352
9. Васильева А.В., Васильев А.С., Сычева Е.А., Коротаев В.В. Высокоточный абсолютный линейный датчик положения на основе стандартной штриховой меры // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2018. Т. 61. № 9. С. 796–804. https://doi.org/10.17586/0021-3454-2018-61-9-796-804
10. Lashmanov O.U., Vasilev A.S., Vasileva A.V., Anisimov A.G., Korotaev V.V. High-precision absolute linear encoder based on a standard calibrated scale // Measurement. 2018. V. 123. P. 226–234. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.03.071
11. Anisimov A.G., Pantyushin A.V., Lashmanov O.U., Vasilev A.S., Timofeev A.N., Korotaev V.V., Gordeev S.V. Absolute scale-based imaging position encoder with submicron accuracy // Proceedings of SPIE. 2013. V. 8788. P. 87882T. https://doi.org/10.1117/12.2021022
12. Горбачёв А.А., Коротаев В.В., Ярышев С.Н. Твердотельные матричные фотопреобразователи и камеры на их основе. СПб.: НИУ ИТМО, 2013. 98 с.
13. Виссарионова Е.С., Бобе А.С., Кузнецов В.Н. Оптическое анаморфирование для схемы энкодера линейного перемещения // XII Конгресс молодых ученых: сборник научных трудов. 2023. С. 74–77.
14. Евтихиев Н.Н., Козлов А.В., Краснов В.В., Родин В.Г., Стариков Р.С., Черёмхин П.А. Метод измерения шумов цифровых камер автоматической сегментацией полосовой сцены // Компьютерная оптика. 2021. Т. 45. № 2. С. 267–276. https://doi.org/10.18287/2412-6179-CO-815
15. Коротаев В.В., Краснящих А.В. Оптико-электронные приборы с оптической равносигнальной зоной: Методические указания по выполнению лабораторных работ. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2005. 115 с.

4. Cosijns S.J.A.G., Jansen M.J., Haitjema H. Advanced optical incremental sensors: encoders and interferometers. *Smart sensors and MEMS: Intelligent Sensing Devices and Microsystems for Industrial Applications. Second Edition*, 2018, pp. 245–290. https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102055-5.00010-3
5. Ye G, Liu H., Fan S., Li X., Yu H., Lei B., Shi Y., Yin L., Lu B. A theoretical investigation of generalized grating imaging and its application to optical encoders. *Optics Communications*, 2015, vol. 354, pp. 21–27. https://doi.org/10.1016/j.optcom.2015.05.023
6. Luo L., Shan S., Li X. A review: laser interference lithography for diffraction gratings and their applications in encoders and spectrometers. *Sensors*, 2024, vol. 24, no. 20, pp. 6617. https://doi.org/10.3390/s24206617
7. Ye G., Liu H., Lei B., Niu D., Xing H., Wei P., Lu B., Liu H. Optimal design of a reflective diffraction grating scale with sine-trapezoidal groove for interferential optical encoders. *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, vol. 134, pp. 106196. https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2020.106196
8. Yu H., Chen X., Liu C., Cai G., Wang W. A survey on the grating based optical position encoder. *Optics and Laser Technology*, 2021, vol. 143, pp. 107352. https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2021.107352
9. Vasileva A.V., Vasilev A.S., Sycheva E.A., Korotaev V.V. High-precision absolute linear position sensor based on a standard line measure. *Journal of Instrument Engineering*, 2018, vol. 61, no. 9, pp. 796—804. (in Russian). https://doi.org/10.17586/0021-3454-2018-61-9-796-804
10. Lashmanov O.U., Vasilev A.S., Vasileva A.V., Anisimov A.G., Korotaev V.V. High-precision absolute linear encoder based on a standard calibrated scale. *Measurement*, 2018, vol. 123, pp. 226–234. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.03.071
11. Anisimov A.G., Pantyushin A.V., Lashmanov O.U., Vasilev A.S., Timofeev A.N., Korotaev V.V., Gordeev S.V. Absolute scale-based imaging position encoder with submicron accuracy. *Proceedings of SPIE*, 2013, vol. 8788, pp. 87882T. https://doi.org/10.1117/12.2021022
12. Gorbachev A.A., Korotaev V.V., Iaryshev S.N. *Solid-state Matrix Photoconverters and Cameras Based on them*. St. Petersburg, NIU ITMO, 2013, 98 p. (in Russian)
13. Vissarionova E.S., Bobe A.S., Kuznetcov V.N. Optical anamorphism for linear encoder circuit. *Proc. of the 12th Congress of Young Scientists*, 2023, pp. 74–77. (in Russian)
14. Evtikhiev NN, Kozlov AV, Krasnov VV, Rodin VG, Starikov RS, Cheremkhin PA. A method for measuring digital camera noise by automatic segmentation of a striped target. *Computer Optics*, 2021, vol. 45, no. 2, pp. 267–276. (in Russian). https://doi.org/10.18287/2412-6179-CO-815
15. Korotaev V.V., Krasniashchikh A.V. *Optoelectronic Devices with Optical Equisignal Region*. St. Petersburg, NIU ITMO, 2005, 115 p. (in Russian)

Авторы

Кузнецов Владимир Николаевич — инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, SC 57673212700, https://orcid.org/0000-0001-7565-2466, vnkuznetcov@itmo.ru

Гармаев Аюр Тумэнович — инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, https://orcid.org/0009-0005-2977-5840, a_garmayev@list.ru

Дейнека Иван Геннадьевич — кандидат технических наук, доцент, заведующий лабораторией, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, SC 6603305268, https://orcid.org/0000-0003-1557-8035, igdeyneka@itmo.ru

Васильев Александр Сергеевич — кандидат технических наук, научный сотрудник, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, SC 24468859400, https://orcid.org/0000-0002-2080-3252, a_s_vasilev@itmo.ru

Глазунов Кирилл Александрович — инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, https://orcid.org/0009-0002-6645-2432, k1ria@live.ru

Authors

Vladimir N. Kuznetsov — Engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, SC 57673212700, https://orcid.org/0000-0001-7565-2466, vnkuznetcov@itmo.ru

Ayur T. Garmaev — Engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, https://orcid.org/0009-0005-2977-5840, a_garmayev@list.ru

Ivan G. Deyneka — PhD, Associate Professor, Head of Laboratory, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, SC 6603305268, https://orcid.org/0000-0003-1557-8035, igdeyneka@itmo.ru

Aleksandr S. Vasilev — PhD, Scientific Researcher, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, SC 24468859400, https://orcid.org/0000-0002-2080-3252, a_s_vasilev@itmo.ru

Kirill A. Glazunov — Engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, https://orcid.org/0009-0002-6645-2432, k1ria@live.ru

Статья поступила в редакцию 26.11.2024
Одобрена после рецензирования 10.06.2025
Принята к печати 24.07.2025

Received 26.11.2024
Approved after reviewing 10.06.2025
Accepted 24.07.2025

Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ
июль–август 2025 Том 25 № 4 http://ntv.ifmo.ru/
SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL OF INFORMATION TECHNOLOGIES, MECHANICS AND OPTICS
Jule–August 2025 Vol. 25 No 4 http://ntv.ifmo.ru/en/
ISSN 2226-1494 (print) ISSN 2500-0373 (online)

НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ И НАНОТЕХНОЛОГИИ
MATERIAL SCIENCE AND NANOTECHNOLOGIES

doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-4-643-650

A structural study of *N*-(2-(2-(2-azidoethoxy)ethoxy)ethyl)-4,6-di(aziridin-1-yl)-1,3,5-triazin-2-amine by density functional theory calculations

Kirill V. Timoshchuk[1], Ivan S. Chernov[2], Olga S. Shemchuk[3], Aleksandra V. Protas[4], Olga V. Mikolaichuk[5]✉, Elena A. Popova[6], Oleg E. Molchanov[7], Dmitrii N. Maistrenko[8]

[1] St. Petersburg State Institute of Technology, Saint Petersburg 190013, Russian Federation
[1,2,3,4,6] Pavlov First Saint Petersburg State Medical University, Saint Petersburg, 197022, Russian Federation
[3,5,7,8] Granov Russian Research Center for Radiology and Surgical Technologies, Saint Petersburg, 197758, Russian Federation

[1] kirill.timoshhuk99@mail.ru, https://orcid.org/0009-0003-8862-719X
[2] i.chernov@green-van.ru, https://orcid.org/0009-0009-8950-884X
[3] Olja.shemchuk17@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-3060-2232
[4] aleksandra.protas@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-1920-9360
[5] olgamedchem@gmail.com✉, https://orcid.org/0000-0002-0463-7725
[6] popova_e_a@bk.ru, https://orcid.org/0000-0002-6513-6983
[7] molchanovo@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-3882-1720
[8] st801293@spbu.ru, https://orcid.org/0000-0001-8174-7461

Abstract

Currently, antitumor drug therapy is represented by three directions: chemotherapy, targeted therapy and immunotherapy. Chemotherapy is a non-specific treatment that uses chemicals that inhibit cell proliferation, affect cellular DNA or RNA and cellular metabolism which contributes to the destruction of all dividing cells. Six-membered heterocyclic ring — 1,3,5-triazine and its derivatives are increasingly found in the literature as DNA alkylating agents. One of such triazine derivatives, N-(2-(2-(2-(2-azidoethoxy)ethoxy)ethyl)-4,6-di(aziridin-1-yl)-1,3,5-triazin-2-amine, previously obtained in our research group, was characterized, and its structure was optimized using the Density Functional Theory (DFT) method, B3LYP functional and 6-31G basis set. The theoretically obtained spectral characteristics were confirmed by practical results with a high degree of convergence. In this work, quantum chemical calculations were performed at different DFT levels using the ORCA software package. The structure of *N*-(2-(2-(2-azidoethoxy)ethoxy)ethyl)-4,6-di(aziridin-1-yl)-1,3,5-triazin-2-amine was optimized using the B3LYP functional with the 6-31G basis set. ^{1}H and ^{13}C (DMSO-d_6) Nuclear Magnetic Resonance spectra were recorded on a Bruker 300 Avance instrument at frequencies of 400.0 and 100.0 MHz, respectively. At the first stage of computer modeling, the electronic structure of the molecule was calculated using the DFT method and the geometry was optimized. The calculation was performed in the 6-31G basis set with the B3LYP functional and taking into account the polarization of the solvent (water) with a relative permittivity of 78.54. The charges on the atoms were estimated using the Mulliken scheme. The energy values (eV) for the molecule are: HOMO: –6.279, LUMO: –1.147. The optimized structure was stable, and the charge distribution on the atoms allows us to conclude that there are three possible conformations of *N*-(2-(2-(2-azidoethoxy)ethoxy)ethyl)-4,6-di(aziridin-1-yl)-1,3,5-triazin-2-amine. In the next step, for calculations with periodic boundary conditions, 20 studied molecules and approximately $1.3 \cdot 10^5$ water molecules were placed in a cubic box with sides of 16 nm; the distance between *N*-(2-(2-(2-azidoethoxy)ethoxy)ethyl)-4,6-di(aziridin-1-yl)-1,3,5-triazin-2-amine molecules was at least 3 nm, and the distance from the molecule to the wall was at least 1.5 nm. The force field for the OPLS-AA/M system was used; the simulation time was 200 ns with a step of 1 fs. Then, in the GROMACS 2023 package in the NVT ensemble with a Berendsen thermostat and a barostat for 400 ps with a time step of 0.1 fs under the condition at temperature T = 298.15 K and pressure P = 100 kPa, solvation of the system, energy minimization and equilibration were carried out. It is shown that when performing the dynamics of association, these molecules do not form aggregates in an aqueous solution. In this work, the synthesis and characterization of *N*-(2-(2-(2-(2-azidoethoxy)ethoxy)ethyl)-4,6-di(aziridin-1-yl)-1,3,5-triazin-2-amine by spectroscopic methods are described. The results of the molecular docking studies are consistent with the *in vitro* antitumor activity which showed that the compound exhibits maximum efficiency and show

© Timoshchuk K.V., Chernov I.S., Shemchuk O.S., Protas A.V., Mikolaichuk O.V., Popova E.A., Molchanov O.E., Maistrenko D.N., 2025

approximate binding energies in the range from –1.034 to –4.578 kcal·mol^{-1} *N*-(2-(2-(2-(2-azidoethoxy)ethoxy)ethyl)-4,6-di(aziridin-1-yl)-1,3,5-triazin-2-amine has been demonstrated to have a high affinity for serum albumin, indicating its potential for serum distribution.

Keywords
1,3,5-triazine, aziridine, NMR, DFT, HSA binding, B3LYP

Acknowledgements
This work was supported by the Ministry of Health of the Russian Federation №1024022100070-3-3.2.21 (Creation of a selective poly(ADP-ribose) polymerase inhibitor of the first type (PARP1) based on condensed heterocyclic systems). Research was performed using the equipment of the Center for Optical and Laser Materials Research, Magnetic Resonance Research Center, Computer Center of SPbU and Center for Chemical Analysis and Materials Research of the Research Park of Saint Petersburg State University.

For citation: Timoshchuk K.V., Chernov I.S., Shemchuk O.S., Protas A.V., Mikolaichuk O.V., Popova E.A., Molchanov O.E., Maistrenko D.N. A structural study of *N*-(2-(2-(2-azidoethoxy)ethoxy)ethyl)-4,6-di(aziridin-1-yl)-1,3,5-triazin-2-amine by density functional theory calculations. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2025, vol. 25, no. 4, pp. 643–650. doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-4-643-650

УДК 544.18; 544.183; 539.194

Исследование спектральных характеристик *N*-(2-(2-(2-азидоэтокси)этокси) этил)-4,6-ди(азиридин-1-ил)-1,3,5-триазин-2-амина с помощью методов теории функционала плотности

Кирилл Владимирович Тимощук[1], Иван Сергеевич Чернов[2], Ольга Сергеевна Шемчук[3], Александра Владимировна Протас[4], Ольга Владиславовна Миколайчук[5]✉, Елена Александровна Попова[6], Олег Евгеньевич Молчанов[7], Дмитрий Николаевич Майстренко[8]

[1] Санкт-Петербургский государственный технологический институт, Санкт-Петербург, 190013, Российская Федерация
[1,2,3,4,6] Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет имени академика И.П. Павлова, Санкт-Петербург, 197022, Российская Федерация
[3,5,7,8] Российский научный центр радиологии и хирургических технологий им. Гранова, Санкт-Петербург, 197758, Российская Федерация

[1] kirill.timoshhuk99@mail.ru, https://orcid.org/0009-0003-8862-719X
[2] i.chernov@green-van.ru, https://orcid.org/0009-0009-8950-884X
[3] Olja.shemchuk17@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-3060-2232
[4] aleksandra.protas@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-1920-9360
[5] olgamedchem@gmail.com✉, https://orcid.org/0000-0002-0463-7725
[6] popova_e_a@bk.ru, https://orcid.org/0000-0002-6513-6983
[7] molchanovo@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-3882-1720
[8] st801293@spbu.ru, https://orcid.org/0000-0001-8174-7461

Аннотация
Введение. На сегодняшний день лекарственная противоопухолевая терапия представлена тремя направлениями: химиотерапия, таргетная терапия и иммуннотерапия. Химиотерапия является неспецифическим лечением, в котором используются химические вещества, препятствующие пролиферации клеток, воздействующие на клеточную дезоксирибонуклеиновую кислоту (ДНК) или рибонуклеиновую кислоту и клеточный метаболизм, что способствует уничтожению всех делящихся клеток. Шестичленное гетероциклическое кольцо — некоторые производные 1,3,5-триазина встречаются в научных публикациях в качестве алкилирующих ДНК-агентов все чаще. Одно из таких производных триазина, *N*-(2-(2-(2-азидоэтокси)этокси)этил)-4,6-ди(азиридин-1-ил)-1,3,5-триазин-2-амин, полученное на кафедре общей и биоорганической химии ПСПбГМУ им. акад. И.П. Павлова, было синтезировано, а его структура оптимизирована с использованием метода теории функционала плотности Density Functional Theory (DFT), функционала B3LYP и базисного набора 6-31G. Теоретически полученные спектральные характеристики были подтверждены практическими результатами с высокой степенью сходимости. **Метод.** В настоящей работе квантово-химические расчеты проводились на разных уровнях DFT с использованием программного пакета ORCA. Структура *N*-(2-(2-(2-азидоэтокси)этокси)этил)-4,6-ди(азиридин-1-ил)-1,3,5-триазин-2-амина была оптимизирована с применением функционала B3LYP с использованием базисного набора 6-31G. Спектры ядерного магнитного резонанса ^{1}H и ^{13}C (DMCO-d_6) зарегистрированы на приборе Bruker 300 Avance на частотах 400 и 100 МГц соответственно. **Основные результаты.** На первом этапе компьютерного моделирования рассчитана электронная структура молекулы с помощью метода DFT и произведена оптимизация геометрии. Расчет производился в наборе 6-31G с функционалом B3LYP и учетом поляризации растворителя (воды) с относительной диэлектрической постоянной 78,54. Заряды на атомах оценивались по схеме Малликена. Значения энергий для молекулы составило для HOMO: –6,279 эВ, LUMO: –1,147 эВ. Оптимизированная структура была стабильна, а распределение зарядов на атомах позволяет сделать вывод о наличии трех возможных конформациях *N*-(2-(2-(2-азидоэтокси)этокси)этил)-4,6-ди(азиридин-1-ил)-1,3,5-триазин-2-амина. На следующем этапе для расчетов с периодическими граничными условиями 20 исследуемых молекул и примерно 1,3·10^{5} молекул воды были помещены в кубическую коробку со сторонами

16 нм; расстояние между молекулами *N*-(2-(2-(2-азидоэтокси)этокси)этил)-4,6-ди(азиридин-1-ил)-1,3,5-триазин-2-амина составляло не менее 3 нм, расстояние от молекулы до стенки — не менее 1,5 нм. Использовалось силовое поле для системы OPLS-AA/M; время моделирования составляло 200 нс с шагом 1 фс. Далее в пакете GROMACS 2023 в ансамбле NVT с термостатом Берендсена и баростатом в течение 400 пс с шагом по времени 0,1 фс при температуре T = 298,15 К и давлении P = 100 кПа проводили сольватацию системы, минимизацию энергии и уравновешивание. Показано, что при проведении динамики на ассоциацию данные молекулы не образуют агрегатов в водном растворе. **Обсуждение.** В работе описан синтез и характеристика *N*-(2-(2-(2-азидоэтокси)этокси)этил)-4,6-ди(азиридин-1-ил)-1,3,5-триазин-2-амина спектроскопическими методами. Результаты проведенных исследований молекулярного докинга, согласуются с противоопухолевой активностью *in vitro*, которая показала, что соединение проявляет максимальную эффективность и показывают приблизительные значения энергии связывания в диапазоне от –1,034 до –4,578 ккал/моль. Показано, что *N*-(2-(2-(2-азидоэтокси)этокси)этил)-4,6-ди(азиридин-1-ил)-1,3,5-триазин-2-амин обладает высоким сродством к сывороточному альбумину, что указывает на его потенциал для распределения в сыворотке.

Ключевые слова

1,3,5-триазин, азиридин, ЯМР, молекулярная динамика, альбумин, B3LYP

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Министерства здравоохранения Российской Федерации государственное задание № 1024022100070-3-3.2.21. Исследование выполнено с использованием оборудования Центра оптических и лазерных материалов, Центра магнитно-резонансных исследований, Вычислительного центра СПбГУ Научного парка СПбГУ.

Ссылка для цитирования: Тимощук К.В., Чернов И.С., Шемчук О.С., Протас А.В., Миколайчук О.В., Попова Е.А., Молчанов О.Е., Майстренко Д.Н. Исследование спектральных характеристик *N*-(2-(2-(2-азидоэтокси)этокси)этил)-4,6-ди(азиридин-1-ил)-1,3,5-триазин-2-амина с помощью методов теории функционала плотности // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2025. Т. 25, № 4. С. 643–650 (на англ. яз.). doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-4-643-650

Introduction

Heterocycles that contain nitrogen are essential structural elements of many contemporary medications that have long-term therapeutic effects [1]. The synthesis of extremely effective cytostatics is one of the heterocycles promising uses in medicine, including 1,3,5-triazines [2]. For the theoretical study of different physical and thermochemical parameters of molecules, including nitrogen-containing heterocycles, Density Functional Theory (DFT) is a computational quantum mechanical modeling technique that has grown to be a potent tool. A synthesis and DFT analysis of certain pyrazole derivatives, specifically thiophenes, 1,3-thiazoles, and 1,3,4-thiadiazoles, were reported by Rodrigo et al. [3] and Asmaa et al. [4]. Zhou et al. [5] reported on the connection between structure and biological activity of pyrazole carboxamide derivatives in the HOMO-LUMO study. Dhonnar and associates [6] used the 6-311++G(d,p) template to study the synthesis and theoretical analysis of 2-(aryl)-5-(3-(difluoromethyl)-1-methyl-1H-pyrazol-4-yl)-1,3,4-Oxadiazoles using the DFT and MD calculations methods. Therefore, DFT is regarded as the most significant and fruitful approach in the field of pharmaceuticals and pharmaceutical chemistry. Initially, researchers must identify the crucial rarity property in the DFT. All the molecules other characteristics, including its ground energy state, can be readily ascertained using the electron density principle. In a previous study we reported synthetic methods of *N*-(2-(2-(2-azidoethoxy)ethoxy)ethyl)-4,6-di(aziridin-1-yl)-1,3,5-triazine-2-amine (Compound 1) (Fig. 1) [7].

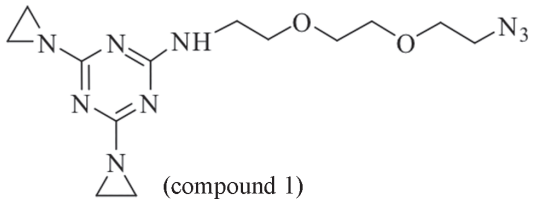


Fig. 1. Structure of *N*-(2-(2-(2-azidoethoxy)ethoxy)ethyl)-4,6-di(aziridin-1-yl)-1,3,5-triazine-2-amine

In the current study, Compound 1 is synthesized and characterized by ^{1}H Nuclear Magnetic Resonance (NMR), ^{13}C NMR. The geometric optimization is done by using the B3LYP functional with 6-31G basis set. The computer simulation of the process of Compound 1 association in aqueous solution was carried out using GROMACS 2023. Molecular docking simulations were applied to comprehend the binding of Compound 1 to the molecular target of Human Serum Albumin (HSA). Obtained results are in good correlations with experimental data regarding binding affinity by HSA.

Materials and Methods

Experimental NMR measurements

^{1}H and ^{13}C{1H} NMR spectra were obtained on a Bruker Avance III 400 spectrometer (Germany) (400.13 MHz for ^{1}H and 100.61 MHz for ^{13}C) in DMSO-d_6 at 298.15 K.

DFT and MD calculations

In the first stage of computational modeling, the optimized geometry and electronic structure of the molecule was calculated using DFT. The calculations were performed using the 6-31G basis set with the B3LYP functional, considering the polarization of the solvent (water) with a relative permittivity of 78.54. Computer modeling NMR was performed using basis and functional 6-31G B3LYP and DMSO-d_6 polarization was taken into account. For the calculations with periodic boundary

conditions, 20 studied molecules and approximately $1.3 \cdot 10^5$ water molecules were placed in a cubic box with sides of 16 nm; the distance between *N*-(2-(2-(2-azidoethoxy) ethoxy)ethyl)-4,6-di(aziridin-1-yl)-1,3,5-triazin-2-amine molecules was at least 3 nm, and the distance from the molecule to the wall was at least 1.5 nm. The Optimized Potentials for Liquid Simulations (OPLS) force field for the OPLS-AA/M system was used; the simulation time was 200 ns with a step of 1 fs. Next, in the GROMACS 2023 package in the NVT ensemble with a Berendsen thermostat and a barostat for 400 ps with a time step of 0.1 fs under the condition at temperature $T = 298.15$ K and pressure $P = 100$ kPa, solvation of the system, energy minimization and equilibration were carried out.

HSA preparation with Maestro 11.5

Crystal structures of the target protein (HSA) were taken from the Protein Data Bank digital library. The structures were selected according to the best binding constants and high resolution of the structural data (4L9K, 5GIX, 2BXD, 3LU6, 2BXF, 1E7A). The resulting structures were prepared using the Maestro 11.5 protein preparation wizard (Maestro, v. 11.5 Schrodinger, LLC, USA). Bond orders in the protein were restored and water molecules were removed. OPLS force field was used to optimize the protein. The ligand structure was preliminarily established by quantum-chemical calculations and then saved in 3D format. The compound was further prepared using LigPrep 3.6, it was used to create the conformational structure of the ligands by removing ions and adding hydrogen molecules and ionization at pH (7.0 ± 2.0). Energy minimization was performed with an OPLS force field using conventional atomic mechanics energy capacity and Root Mean Square Deviation (RMSD) cutoff of 0.001 nm to create an isomer with minimal energy. The modeled 3D structure of the human Prostate Specific Antigen (PCA) was prepared using the Protein Preparation panel on the Schrödinger platform. Protein preparation methods include many steps, such as adding protons, determining bond order, optimizing protonation states and hydrogen bond networks, and minimizing the protein structure. Protons were added to meet structural requirements, and side chains were optimized either near the binding cavity or near the active center or salt bridges. Hydrogen atoms were added to the structure, in the form of hydroxyl and thiol hydrogen atoms, in protonation states and tautomers of histidine residues, and as "flipped" asparagine, glutamic acid, and histidine residues. The optimized structure was minimized using the OPLS-AA force field until the RMSD of the non-hydrogen atoms reached 0.03 nm. A docking study was performed using a grid-based method to analyze the interaction of the selected compound with Carbamylated form of Human Serum Albumin (ChSA). The receptor grid was created to ensure that other amino acids are involved in the interaction of the compound with ChSA. For the receptor, a 3 × 3 × 3 × 3 nm grid was created with a default inner core (1 × 1 × 1 × 1 nm) centered on the corresponding ligand. After grid creation, all prepared conformations of the selected compound were docked to the binding site using GlideXP docking which allows free docking of compounds. The compounds were selected for further evaluation based on various docking parameters such as docking score, binding energy and physical parameters such as hydrogen bond interactions. Maestro 11.5 software was used as a visualization tool for the docked ligands.

Results and discussion

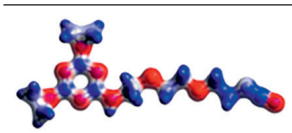
DFT Calculation

DFT calculations using the 6-31G basis set provide a computationally efficient approach for predicting atomic charges, offering a good balance between accuracy and computational cost for routine structural characterization. Atomic charges were estimated using the Malliken scheme. The energy values (in electronvolts) for the molecule are as follows: HOMO: –6.279, LUMO: –1.147. The obtained data are consistent with previously obtained values for triazines [8]. The results of the spatial distribution of the charge density surface are presented in Table 1.

As can be seen from the obtained results, a significant negative charge is concentrated on the nitrogen and oxygen atoms; however, the nitrogen atom designated as N8 exhibits a positive charge, which is consistent with previous data [9]. Furthermore, thermodynamic functions for Compound 1 were obtained (Table 2).

The molecular dynamics method was used to study the connection of molecules of Compound 1 with each other in an aquatic environment. The charges on the atoms, estimated using the Mulliken scheme, are used based on quantum chemical calculations. The OPLS-AA/M force field was used for the calculations; the simulation time was 200 ns with a time step of 1 fs. The 200 ns simulation time represents an optimal compromise between sufficient duration for observing associative processes, correspondence to experimental time scales and comparable to the relaxation time in NMR measurements. Subsequently, in the GROMACS 2023 package, NVT and NPT ensembles with the Berendsen thermostat was used for 400 ps with a time step of 0.1 fs, under conditions of $T = 298.15$ K and $P = 100$ kPa to perform system solvation, energy minimization, and equilibration. Molecular dynamics were used to further investigate possible aggregation pathways of the Compound 1 molecules. During the modeling of molecule association in water, it was found

Table 1. Red color is the region of increased negative charge; blue color is the region of positive charge. Charges on atoms, eV

Compound	N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8	N9	O1	O2
	–0.477	–0.432	–0.477	–0.441	–0.448	–0.656	–0.273	0.130	–0.146	–0.570	–0.581

that the approach of these molecules to each other is quite problematic; by 150 ns, clusters do not form in the system. Further, by 200 ns, no associates were formed in water (Fig. 2). At the end of the study, Compound 1 is released as individual molecules in water. The potential for clustering in water is also indicated by the low control panel graph the values of which continue to be maintained throughout the entire dynamic (Fig. 3). At the end of the simulation in water, the 1,3,5-triazine molecules remained as individual molecules. The low clustering potential in water is also evidenced by the surface area reduction plot, whose values remain constant throughout the entire dynamics (Fig. 2 and 3).

NMR Analysis

It should be noticed that the 6-31G basis set is particularly well-suited for organic molecules as it adequately describes the valence electrons of carbon and hydrogen atoms while maintaining reasonable computational demands, making it a good choice for NMR shift predictions in medium-sized organic systems. NMR spectroscopy is still one of the most powerful techniques available for the detection and investigation of the behavior of such dynamic organic compounds for medical applications in several time scales. Using computer modeling nuclear magnetic resonance for Compound 1 was calculated using the DFT method and geometry optimization was performed. Excellent linear regression correlation coefficient ($R^2 > 0.998$) is obtained for the obtained results (Table 2). Neutralizer polarization of solvent (DMSO) was considered.

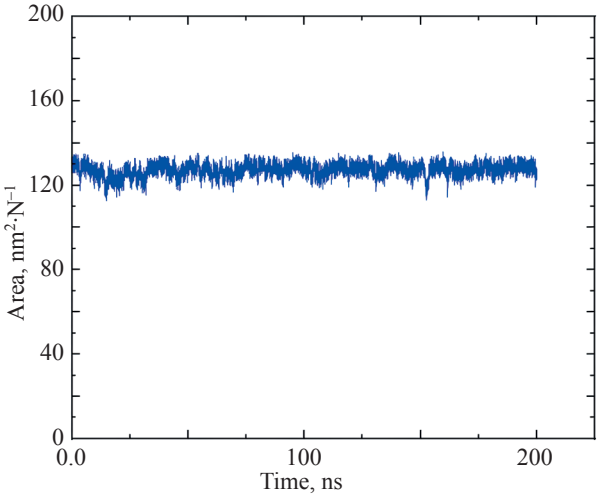


Fig. 2. Graph of surface area, interaction with solvent (water), where N represents number of molecules of 1,3,5-triazine

The data given in Table 3 shows that the Signed Deviations (SD) are typically positive, indicating that the computed ^{13}C NMR chemical shifts are exclusively higher than those of the experimental ones.

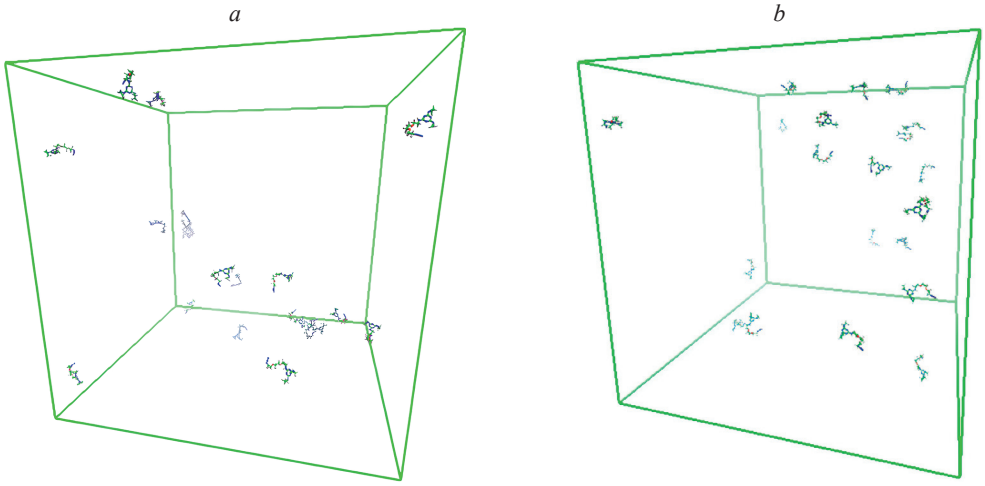


Fig. 3. Molecular dynamics visualization: association of 1,3,5-triazine derivative molecules in water after 150 ns (*a*) and 200 ns (*b*)

Table 2. NMR shifts

NMR	Group	DMSO-d_6, ppm	
		DFT method	Practice
^{1}H	$CH_{2\ peg}$	3.88, 3.67, 3.45, 3.38	3.66, 3.62, 3.43–3.37
^{13}C	$C_{triazine}$	170.98, 170.85, 169.26	174.05, 169.62, 166.43
	$CH_{2\ aziridine}$	33.54, 32.96, 32.84, 32.70	28.88, 27.43, 27.21, 26.21
	$CH_{2\ peg}$	63.38, 59.95	62.18, 59.98
	CH_2–O–	71.92, 71.92	70.12, 70.44
	CH_2–N_3	72.68	70.60
	CH_2–NH–	40.71	40.62

Table 3. The SD values for 13C NMR shifts

Group	SD, ppm
$C_{triazine}$	+0.096
$CH_{2\ aziridine}$	+4.320
$CH_{2\ peg}$	+0.585
CH_2–O–	+1.640
CH_2–N_3	+2.080
CH_2–NH–	+0.090

Table 4. Values of the ultimate binding energy in the docking process

Glide docking score, kcal/mol	IA	IIA	IIIA	IB	IIB	IIIB
XP GScore	–2.477	–1.034	–4.127	–3.808	–4.578	–2.128

Based on the data provided in Table 3, the lowest convergence is found in the signed deviations of aziridine ring from the NMR shift. The SD for the ^{1}H NMR chemical shifts weren't calculated due to appearance of many signals as multiplets (doublets, triplets, etc.), making it difficult to select a single representative value for each proton environment for statistical analysis. This approach ensures consistency in our comparison between experimental and DFT-calculated chemical shifts by avoiding arbitrary selection of specific peaks within multiplet patterns.

HSA-Binding Assay

To design better therapeutics, it is important to understand how a molecule interacts with protein. Thus, great interest is paid to the understanding of the binding mechanism of molecules with carrier proteins like HSA. It has been extensively utilized as a model protein for decoding protein-ligand interactions. Computational methods have evolved as an effective tool for predicting the properties of newly synthesized organic compounds and the nature of interactions in a protein-ligand complex. After successful exploration of probable mode of fluorescence quenching [10], an attempt has been made to explore the presence the various non-covalent forces such as van der Waals forces, hydrophobic interactions, hydrogen bonding and electrostatic interactions that are involved in the binding of the proteins with ligands. The value of Gibb's free energy change was calculated to analyze the nature of binding interactions between Compound 1 and HSA. The spontaneous nature of the interaction was confirmed by the negative value of Gibb's free energy (XP GScore, Table 4). It was shown that when binding to HSA, the 1,3,5-triazine derivative has a higher affinity for subdomain IIB. Furthermore, data obtained is consistent with the experimental data published before [11].

Conclusion

Various characterizations calculated by Density Functional Theory (DFT) method were considered to predict the ^{1}H and ^{13}C-NMR chemical shifts in *N*-(2-(2-(2-azidoethoxy)ethoxy)ethyl)-4,6-di(aziridin-1-yl)-1,3,5-triazin-2-amine (Compound 1). The computational results were predicted using the experimental shifts as a reference using several statistical descriptors. From the calculated data, excellent linear correlations were obtained between the DFT calculated and experimental ^{1}H Nuclear Magnetic Resonance (NMR) chemical shifts for all the chemical characterizations tested. Based on the NMR shift, we also discovered that the B3LYP functional with 6-31G basis had the lowest convergence for the small aziridine ring. What makes the B3LYP functional with 6-31G basis set method inapplicable for calculating NMR chemical shifts of methylene groups of small rings. Molecular docking simulations were applied to comprehend the binding of Compound 1 to the molecular target of Human Serum Albumin. Compound 1 has been demonstrated to have a high affinity for serum albumin's subdomain IIB XP GScore –4.578 kcal/mol, indicating its potential for serum distribution.

References

1. Kumar A., Singh A.K., Singh H., Vijayan V., Kumar D., Naik J., Thareja S., Yadav J.P., Pathak P., Grishina M., et al. Nitrogen containing heterocycles as anticancer agents: a medicinal chemistry perspective. *Pharmaceuticals*, 2023, vol. 16, no. 2, pp. 299. https://doi.org/10.3390/ph16020299
2. Lim H.Y., Dolzhenko A.V. 1,3,5-Triazine as a promising scaffold in the development of therapeutic agents against breast cancer. *European Journal of Medicinal Chemistry*, 2024, vol. 276, pp. 116680. https://doi.org/10.1016/j.ejmech.2024.116680
3. Faundez-Gutierrez R., Macleod-Carey D., Zarate X., Bustos C., Molins E., Schott E. Synthesis, characterization and DFT study of a new family of pyrazole derivatives. *Polyhedron*, 2014, vol. 81, pp. 414–420. https://doi.org/10.1016/j.poly.2014.06.003

Литература

1. Kumar A., Singh A.K., Singh H., Vijayan V., Kumar D., Naik J., Thareja S., Yadav J.P., Pathak P., Grishina M., et al. Nitrogen containing heterocycles as anticancer agents: a medicinal chemistry perspective // Pharmaceuticals. 2023. V. 16. N 2. P. 299. https://doi.org/10.3390/ph16020299
2. Lim H.Y., Dolzhenko A.V. 1,3,5-Triazine as a promising scaffold in the development of therapeutic agents against breast cancer // European Journal of Medicinal Chemistry. 2024. V. 276. P. 116680. https://doi.org/10.1016/j.ejmech.2024.116680
3. Faundez-Gutierrez R., Macleod-Carey D., Zarate X., Bustos C., Molins E., Schott E. Synthesis, characterization and DFT study of a new family of pyrazole derivatives // Polyhedron. 2014. V. 81. P. 414–420. https://doi.org/10.1016/j.poly.2014.06.003

4. Fahim A.M., Farag A.M., Shabaan M.R., Ragab E.A. Synthesis and DFT study of novel pyrazole,thiophene, 1,3-thiazole and 1,3,4-thiadiazole derivatives. *European Journal of Chemistry*, 2018, vol. 9, no. 1, pp. 30–38. https://doi.org/10.5155/eurjchem.9.1.30-38.1675
5. Mu J.X., Shi J.X., Yang M.Y., Sun Z.H., Liu X.H., Li B.J., Sun N.B. Design, synthesis, DFT study and antifungal activity of pyrazolecarboxamide derivatives. *Molecules*, 2016, vol. 21, no. 1, pp. 68. https://doi.org/10.3390/molecules21010068
6. Dhonnar S.L., Buchude S.S., Sargade V.N., Adole V.A., Sadgir N.V. Synthesis, DFT, in silico ADME, and antimicrobial study of new 2-(aryl)-5-(3-(difluoromethyl)-1-methyl-1H-pyrazol-4-yl)-1,3,4-oxadiazoles. *ChemistrySelect*, 2024, vol. 9, no. 46, pp. e202402534. https://doi.org/10.1002/slct.202402534
7. Molchanov O.E., Popova E.A., Maistrenko D.N., Semenov K.N, Protas A.V., Mikolaichuk O.V., Popova A.A, Sharoiko V.V, Shemchuk O.S, Golub V.M. N-(2-(2-(2-azidoethoxy)ethoxy)ethyl)-4,6-di(aziridin-1-yl)-1,3,5-triazin-2-amine, having cytotoxic. *Patent RU* № 2825828C1. 2024. (in Russian)
8. Al-Rasheed H.H., AL-khamis S.A., Barakat A., El-Faham A., Haukka M., Soliman S.M. Synthesis and characterizations of novel isatin-s-triazine hydrazone derivatives; X-ray structure, hirshfeld analysis and DFT calculations. *Crystals*, 2023, vol. 13, no. 2, pp. 305. https://doi.org/10.3390/cryst13020305
9. Yoshikawa N., Yamazaki S., Nishiyama A., Yamashita Y., Kanehisa N., Tohnai N., Nakata E., Takashima H. Structures, atomic charges, emission properties and DFT studies of biquinoline derivatives induced by protonation of a nitrogen atom. *Journal of Molecular Structure*, 2022, vol. 1251, pp. 131990. https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2021.131990
10. Hiremath K.B., Shivashankar M., Chandrasekaran N. Multispectroscopic studies on HSA interaction, DFT calculations, molecular docking, and antimicrobial activities of imine-functionalized tris(hydroxymethyl)aminomethane derivatives. *ChemistrySelect*, 2023, vol. 8, no. 25, pp. e202301772. https://doi.org/10.1002/slct.202301772
11. Alanazi R.L.B., Zaki M., Bawazir W.A. Synthesis and characterization of new metal complexes containing Triazino[5,6–b]indole moiety: In vitro DNA and HSA binding studies. *Journal of Molecular Structure*, 2021, vol. 1246, pp. 131203. https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2021.131203

4. Fahim A.M., Farag A.M., Shabaan M.R., Ragab E.A. Synthesis and DFT study of novel pyrazole,thiophene, 1,3-thiazole and 1,3,4-thiadiazole derivatives // European Journal of Chemistry. 2018. V. 9. N 1. P. 30–38. https://doi.org/10.5155/eurjchem.9.1.30-38.1675
5. Mu J.X., Shi J.X., Yang M.Y., Sun Z.H., Liu X.H., Li B.J., Sun N.B. Design, synthesis, DFT study and antifungal activity of pyrazolecarboxamide derivatives // Molecules. 2016. V. 21. N 1. P. 68. https://doi.org/10.3390/molecules21010068
6. Dhonnar S.L., Buchude S.S., Sargade V.N., Adole V.A., Sadgir N.V. Synthesis, DFT, in silico ADME, and antimicrobial study of new 2-(aryl)-5-(3-(difluoromethyl)-1-methyl-1H-pyrazol-4-yl)-1,3,4-oxadiazoles // ChemistrySelect. 2024. V. 9. N 46. P. e202402534. https://doi.org/10.1002/slct.202402534
7. Молчанов О.Е., Попова Е.А., Майстренко Д.Н., Семенов К.Н, Протас А.В., Миколайчук О.В., Попова А.А, Шаройко В.В, Шемчук О.С, Голуб В.М. N-(2-(2-(2-азидоэтокси)этокси)этил)-4,6-ди(азиридин-1-ил)-1,3,5-триазин-2-амин, обладающий цитотоксическим действием. Патент РФ № 2825828C1. Бюл. 2024. № 25.
8. Al-Rasheed H.H., AL-khamis S.A., Barakat A., El-Faham A., Haukka M., Soliman S.M. Synthesis and characterizations of novel isatin-s-triazine hydrazone derivatives; X-ray structure, hirshfeld analysis and DFT calculations // Crystals. 2023. V. 13. N 2. P. 305. https://doi.org/10.3390/cryst13020305
9. Yoshikawa N., Yamazaki S., Nishiyama A., Yamashita Y., Kanehisa N., Tohnai N., Nakata E., Takashima H. Structures, atomic charges, emission properties and DFT studies of biquinoline derivatives induced by protonation of a nitrogen atom // Journal of Molecular Structure. 2022. V. 1251. P. 131990. https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2021.131990
10. Hiremath K.B., Shivashankar M., Chandrasekaran N. Multispectroscopic studies on HSA interaction, DFT calculations, molecular docking, and antimicrobial activities of imine-functionalized tris(hydroxymethyl)aminomethane derivatives // ChemistrySelect. 2023. V. 8. N 25. P. e202301772. https://doi.org/10.1002/slct.202301772
11. Alanazi R.L.B., Zaki M., Bawazir W.A. Synthesis and characterization of new metal complexes containing Triazino[5,6–b]indole moiety: In vitro DNA and HSA binding studies // Journal of Molecular Structure. 2021. V. 1246. P. 131203. https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2021.131203

Authors

Kirill V. Timoshchuk — PhD Student, Assistant, St. Petersburg State Institute of Technology, Saint Petersburg 190013, Russian Federation; Specialist, Pavlov First Saint Petersburg State Medical University, Saint Petersburg, 197022, Russian Federation, https://orcid.org/0009-0003-8862-719X, kirill.timoshhuk99@mail.ru

Ivan S. Chernov — PhD Student, Pavlov First Saint Petersburg State Medical University, Saint Petersburg, 197022, Russian Federation, https://orcid.org/0009-0009-8950-884X, i.chernov@green-van.ru

Olga S. Shemchuk — Scientific Researcher, Granov Russian Research Center for Radiology and Surgical Technologies, Saint Petersburg, 197758, Russian Federation; Specialist, Pavlov First Saint Petersburg State Medical University, Saint Petersburg, 197022, Russian Federation, SC 57203429632, https://orcid.org/0000-0003-3060-2232, Olja.shemchuk17@gmail.com

Aleksandra V. Protas — PhD (Chemistry), Associate Professor, Pavlov First Saint Petersburg State Medical University, Saint Petersburg, 197022, Russian Federation, https://orcid.org/0000-0002-1920-9360, aleksandra.protas@mail.ru

Olga V. Mikolaichuk — PhD (Chemistry), Senior Researcher, Granov Russian Research Center for Radiology and Surgical Technologies, Saint Petersburg, 197758, Russian Federation, SC 57200216315, https://orcid.org/0000-0002-0463-7725, olgamedchem@gmail.com

Elena A. Popova — D.Sc. (Chemistry), Associate Professor, Professor, Pavlov First Saint Petersburg State Medical University, Saint Petersburg,

Авторы

Тимощук Кирилл Владимирович — аспирант, ассистент, Санкт-Петербургский государственный технологический институт, Санкт-Петербург, 190013, Российская Федерация; специалист, Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет имени академика И.П. Павлова, Санкт-Петербург, 197022, Российская Федерация, https://orcid.org/0009-0003-8862-719X, kirill.timoshhuk99@mail.ru

Чернов Иван Сергеевич — аспирант, Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет имени академика И.П. Павлова, Санкт-Петербург, 197022, Российская Федерация, https://orcid.org/0009-0009-8950-884X, i.chernov@green-van.ru

Шемчук Ольга Сергеевна — научный сотрудник, Российский научный центр радиологии и хирургических технологий им. Гранова, Санкт-Петербург, 197758, Российская Федерация; специалист, Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет имени академика И.П. Павлова, Санкт-Петербург, 197022, Российская Федерация, SC 57203429632, https://orcid.org/0000-0003-3060-2232, Olja.shemchuk17@gmail.com

Протас Александра Владимировна — кандидат химических наук, доцент, Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет имени академика И.П. Павлова, Санкт-Петербург, 197022, Российская Федерация, https://orcid.org/0000-0002-1920-9360, aleksandra.protas@mail.ru

Миколайчук Ольга Владиславовна — кандидат химических наук, старший научный сотрудник, Российский научный центр радиологии и хирургических технологий им. Гранова, Санкт-Петербург, 197758, Российская Федерация, SC 57200216315, https://orcid.org/0000-0002-0463-7725, olgamedchem@gmail.com

Попова Елена Александровна — доктор химических наук, доцент, профессор, Первый Санкт-Петербургский государственный медицин-

197022, Russian Federation, https://orcid.org/0000-0002-6513-6983, popova_e_a@bk.ru

Oleg E. Molchanov — D.Sc., (Medicine), Head of Department, Granov Russian Research Center for Radiology and Surgical Technologies, Saint Petersburg, 197758, Russian Federation, https://orcid.org/0000-0003-3882-1720, molchanovo@mail.ru
Dmitrii N. Maistrenko — D.Sc., (Medicine), Director, Granov Russian Research Center for Radiology and Surgical Technologies, Saint Petersburg, 197758, Russian Federation, https://orcid.org/0000-0001-8174-7461, st801293@spbu.ru

ский университет имени академика И.П. Павлова, Санкт-Петербург, 197022, Российская Федерация, https://orcid.org/0000-0002-6513-6983, popova_e_a@bk.ru
Молчанов Олег Евгеньевич — доктор медицинских наук, руководитель отдела, Российский научный центр радиологии и хирургических технологий им. Гранова, Санкт-Петербург, 197758, Российская Федерация, https://orcid.org/0000-0003-3882-1720, molchanovo@mail.ru
Майстренко Дмитрий Николаевич — доктор медицинских наук, директор, Российский научный центр радиологии и хирургических технологий им. Гранова, Санкт-Петербург, 197758, Российская Федерация, https://orcid.org/0000-0001-8174-7461, st801293@spbu.ru

Received 08.05.2025
Approved after reviewing 27.06.2025
Accepted 19.07.2025

Статья поступила в редакцию 08.05.2025
Одобрена после рецензирования 27.06.2025
Принята к печати 19.07.2025

Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ
июль–август 2025 Том 25 № 4 http://ntv.ifmo.ru/
SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL OF INFORMATION TECHNOLOGIES, MECHANICS AND OPTICS
Jule–August 2025 Vol. 25 No 4 http://ntv.ifmo.ru/en/
ISSN 2226-1494 (print) ISSN 2500-0373 (online)

doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-4-651-662
УДК 004.855.5

Метод генерации анимации цифрового аватара с речевой и невербальной синхронизацией на основе бимодальных данных

Александр Александрович Аксёнов[1]✉, Елена Витальевна Рюмина[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] ryumina.e@iias.spb.su, https://orcid.org/0000-0002-4135-6949
[3] ryumin.d@iias.spb.su, https://orcid.org/0000-0002-7935-0569

Аннотация

Введение. Рассмотрена задача генерации анимации цифрового аватара с синхронным воспроизведением речи, мимики и жестикуляции на основе бимодального входа — статического изображения и текста с эмоциональной окраской. Исследована возможность интеграции акустических, визуальных и аффективных признаков в единую модель, обеспечивающую реалистичное и выразительное поведение аватара в соответствии с содержанием и эмоциональным тоном высказывания. **Метод.** Предложенный метод включает шаги извлечения визуальных ориентиров лица, рук и позы, определения пола для выбора подходящего голосового профиля, анализа текста на предмет эмоционального содержания и генерации синтетической аудиоречи. Все признаки интегрируются в генеративной архитектуре на основе диффузионной модели с механизмами временного внимания и межмодального согласования. Это обеспечивает высокую точность синхронизации между речью и невербальными компонентами поведения аватара. Для обучения использовались два специализированных корпуса: один для моделирования жестикуляции, другой — для мимики. Аннотирование производилось средствами автоматического извлечения пространственных ориентиров. **Основные результаты.** Экспериментальное исследование метода выполнялось на многопроцессорной вычислительной платформе с графическими ускорителями. Качество работы модели оценивалось с помощью объективных метрик. Метод показал высокую степень визуального и семантического соответствия: FID — 50,13; FVD — 601,70; SSIM — 0,752; PSNR — 21,997; E-FID — 2,226; Sync-D — 7,003; Sync-C — 6,398. Модель успешно синхронизирует речь с мимикой и жестами, учитывает эмоциональный контекст текста, а также особенности русского жестового языка. **Обсуждение.** Результаты работы могут найти применение в системах эмоционально-чувствительного человеко-машинного взаимодействия, цифровых ассистентах, образовательных и психологических интерфейсах. Предложенный метод представляет интерес для специалистов в области искусственного интеллекта, мультимодальных интерфейсов, компьютерной графики и цифровой психологии.

Ключевые слова

цифровой аватар, BiMoDiCA, мимика, жесты, латентное пространство, генерация анимации, синтез речи, Denoising U-Net, Stable Diffusion

Благодарности

Разделы «Исследования в области генерации цифровых аватаров» и «Экспериментальные исследования метода» выполнены при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 24-71-00083), остальные исследования — при поддержке того же фонда (проект № 24-71-00112).

Ссылка для цитирования: Аксёнов А.А., Рюмина Е.В., Рюмин Д.А. Метод генерации анимации цифрового аватара с речевой и невербальной синхронизацией на основе бимодальных данных // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2025. Т. 25, № 4. С. 651–662. doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-4-651-662

© Аксёнов А.А., Рюмина Е.В., Рюмин Д.А., 2025

A method for generating digital avatar animation with speech and non-verbal synchronization based on bimodal data

Alexander A. Axyonov[1]✉, Elena V. Ryumina[2], Dmitry A. Ryumin[3]

[1,2,3] St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, 199178, Russian Federation

[1] axyonov.a@iias.spb.su✉, https://orcid.org/0000-0002-7479-2851
[2] ryumina.e@iias.spb.su, https://orcid.org/0000-0002-4135-6949
[3] ryumin.d@iias.spb.su, https://orcid.org/0000-0002-7935-0569

Abstract

This paper addresses the task of generating animations of a digital avatar that synchronously reproduces speech, facial expressions, and gestures based on a bimodal input — namely, a static image and an emotionally colored text. The study explores the integration of acoustic, visual, and affective features into a unified model that enables realistic and expressive avatar behavior aligned with both the semantic content and emotional tone of the utterance. The proposed method includes several stages: extraction of visual landmarks of the face, hands, and body pose; gender recognition for selecting an appropriate voice profile; emotional analysis of the input text; and generation of synthetic speech. All extracted features are integrated within a generative architecture based on a diffusion model enhanced with temporal attention mechanisms and cross-modal alignment strategies. This ensures high-precision synchronization between speech and the avatar nonverbal behavior. The training process utilized two specialized datasets: one focused on gesture modeling, and the other on facial expression synthesis. Annotation was performed using automated spatial landmark extraction tools. Experimental evaluation was conducted on a multiprocessor computing platform with GPU acceleration. The model performance was assessed using a set of objective metrics. The proposed method demonstrated a high degree of visual and semantic coherence: FID — 50.13, FVD — 601.70, SSIM — 0.752, PSNR — 21.997, E-FID — 2.226, Sync-D — 7.003, Sync-C — 6.398. The model effectively synchronizes speech with facial expressions and gestures, accounts for the emotional context of the text, and incorporates features of Russian Sign Language. The proposed approach has potential applications in emotionally aware human — computer interaction systems, digital assistants, educational platforms, and psychological interfaces. The method is of interest to researchers in artificial intelligence, multimodal interfaces, computer graphics, and digital psychology.

Keywords

digital avatar, BiMoDiCA, facial expression, gestures, latent space, animation generation, speech synthesis, Denoising U-Net, Stable Diffusion

Acknowledgements

The “Research on Digital Avatar Generation” and “Experimental Research of the Method” sections were supported by the Russian Science Foundation (Project No. 24-71-00083), while the remaining research was supported by the same Foundation (Project No. 24-71-00112).

For citation: Axyonov A.A., Ryumina E.V., Ryumin D.A. A method for generating digital avatar animation with speech and non-verbal synchronization based on bimodal data. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2025, vol. 25, no. 4, pp. 651–662 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-4-651-662

Введение

Современные технологии в области искусственного интеллекта позволяют создавать мультимодальные человеко-машинные интерфейсы, которые интегрируют речь, жесты, мимику и эмоции. Однако одним из главных ограничений является нехватка разнообразных мультимодальных корпусов для обучения таких интеллектуальных интерфейсов. В частности, существующие корпуса, охватывающие жестовые языки [1, 2] и распознавание эмоций [3], имеют ограниченный объем и не позволяют создавать универсальные решения для распознавания и синтеза жестов и эмоций. Это затрудняет разработку эффективных технологий для взаимодействия не только людей с ограниченными возможностями, но и для создания более естественных и инклюзивных интерфейсов для всех пользователей.

Одним из перспективных направлений развития мультимодальных интерфейсов является генерация анимации цифрового аватара, способного синхронно воспроизводить речь и сопровождающие ее невербальные сигналы — мимику, жесты и позу. Такая синхронизация способна обеспечить более человеко-машинное взаимодействие, приближая поведение аватара к человеческому. Особенно важным это становится в контексте персонализированных сервисов, где доверие и комфорт играют ключевую роль.

В частности, цифровые аватары с поддержкой речевой и эмоциональной синхронизации могут находить применение в области цифровой психологии и эмоционально-чувствительных систем поддержки и мониторинга психоэмоционального состояния пользователей. Такие аватары потенциально способны выступать в роли виртуальных консультантов или личных психологов, адаптируя свое поведение (интонации, выражение лица, жестикуляцию) в зависимости от психоэмоционального состояния пользователя. Это открывает возможности для создания более эмпатичных и индивидуализированных форм взаимодействия, особенно в условиях ограниченного доступа к квалифицированной помощи или в случаях, когда человеку проще взаимодействовать с цифровым помощником.

Кроме того, подобные технологии могут быть использованы в образовательных и тренировочных системах, где цифровые аватары выступают в роли персональных преподавателей или ассистентов, адапти-

рующих свою невербальную и речевую экспрессию в зависимости от контекста и эмоциональной реакции обучающегося. Это особенно актуально для дистанционного и инклюзивного образования, где высокая степень вовлеченности и индивидуальный подход к обучению играют ключевую роль.

С учетом развития синтетических голосов и генеративных моделей, способных воспроизводить реалистичную артикуляцию и мимику, возрастает интерес к созданию цифровых аватаров. Однако для достижения высокого уровня синхронизации между речью, жестами и эмоциональной экспрессией необходим комплексный метод, способный учитывать как акустические, так и визуальные признаки, включая эмоциональный контекст.

Настоящее исследование направлено на разработку метода генерации анимации цифрового аватара под названием BiModal-based Digital Communication Avatar (BiMoDiCA)[1] с согласованной речевой и невербальной синхронизацией на основе бимодальных данных — изображения и текста с эмоциональной окраской. BiMoDiCA учитывает текущие ограничения в доступных корпусах и демонстрирует потенциал создания более универсальных, гибких и реалистичных цифровых аватаров для широкого спектра задач.

Обзор исследований в области генерации цифровых аватаров

Исследования в области генерации цифровых аватаров охватывают широкий спектр методов, направленных на реалистичную анимацию человека с согласованием речевых и невербальных компонентов[2]. Одним из ключевых направлений является генерация анимации на основе последовательностей поз. В таких методах используется информация о пространственном расположении тела человека, представленная в виде пространственных скелетных ориентиров [4], представлений поз [5], карт глубины [6], трехмерных полигональных сеток [7] или оптического потока [8]. Эти данные служат в качестве управляющих модальностей для генеративных моделей, чаще всего основанных на диффузионных архитектурах [9]. Например, в ряде современных методов применяются модели семейства Stable Diffusion [10, 11] или Stable Video Diffusion [12], в которых информация о позе интегрируется в генеративный процесс посредством модулей управления, аналогичных ControlNet [13]. При этом ключевые точки тела извлекаются с использованием библиотек с открытым исходным кодом, таких как MediaPipe[3] или OpenPose[4], и далее используются в качестве управляющих признаков на этапе подавления шума в генеративной модели.

Параллельно активно развиваются методы, в которых основным источником управляющей информации выступает акустический сигнал. Такие интеллектуальные интерфейсы ориентированы на генерацию движений и мимики, синхронизированных с речью, ее интонационными переходами, акустическими акцентами, ритмом и эмоциональной окраской. Большинство современных исследований сосредоточено на генерации реалистичной анимации лица, в том числе синхронизации движений губ и мимики с аудиоречью. Однако появляются методы, направленные и на генерацию полной жестикуляции. Такие решения демонстрируют высокую степень соответствия между эмоциональными характеристиками речи и визуальными компонентами поведения цифрового аватара. Методы, такие как Vlogger [14], Hallo [15] и MegActor-Sigma [16], используют диффузионные модели для генерации высокодетализированного видеоконтента на основе одного изображения и акустического сигнала, с возможностью управления параметрами мимики и позы. Некоторые методы, такие как CyberHost [17] и EchoMimic [18], реализуют мультимодальное управление и позволяют интегрировать в процессе генерации как акустический сигнал, так и данные о характеристиках выражения лица и телесной позы, включая траектории движений, что обеспечивает более гибкий и точный контроль над синхронизацией речевых и невербальных компонентов в анимации цифрового аватара.

Несмотря на определенный прогресс в области генерации анимации цифрового аватара, существующие методы, как правило, ориентированы либо на управление на основе позы, либо на синхронизацию с акустическим сигналом, редко объединяя обе модальности в единой функциональной схеме. Многие из них ограничиваются областью анимации лица, не учитывая движения тела и жестикуляции, или наоборот – сосредотачиваются на скелетных позах без учета мимики и эмоциональной окраски речи. Кроме того, большинство методов требуют крупномасштабных и специфически размеченных корпусов, что ограничивает их обобщающую способность и применение в реальных условиях. Эти ограничения особенно ощутимы в задачах, где требуется высокая степень согласованности между речью, мимикой и телесной экспрессией, как например, при создании эмпатичных цифровых аватаров.

В данном исследовании предлагается метод генерации анимации цифрового аватара, обеспечивающий речевую и невербальную синхронизации на основе бимодального входа (изображения и текста с эмоциональной окраской). В отличие от существующих решений, данный метод интегрирует визуальные, акустические и эмоциональные признаки в единую диффузионную архитектуру, что обеспечивает более точную и реалистичную синхронизацию анимации лица и тела, а также

1 Название метода предложено авторами настоящей работы.

2 The latest AI-powered technologies usher in a new era of realistic avatars [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://huggingface.co/collections/DmitryRyumin/avatars-65df37cdf81fec13d4dbac36, свободный. Яз. англ. (дата обращения: 21.04.2025).

3 MediaPipe [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://ai.google.dev/edge/mediapipe/solutions/guide?hl=ru, свободный. Яз. рус. (дата обращения: 21.04.2025).

4 OpenPose [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://github.com/CMU-Perceptual-Computing-Lab/openpose, свободный. Яз. англ. (дата обращения: 21.04.2025).

позволяет адаптировать поведение аватара в зависимости от контекста и эмоциональной окраски речи.

Метод

BiMoDiCA представляет собой комплексное решение для генерации видеоконтента, направленный на создание цифровых аватаров, способных воспроизводить реалистичную речевую и жестикуляционную анимацию на основе бимодальных данных, включающих статичное изображение и текст с эмоциональной окраской. Ключевая особенность метода заключается в семантически согласованном объединении вербального и невербального поведений (речевых характеристик, мимики и жестов). Такое объединение обеспечивает высокую степень выразительности создаваемого контента, что критически важно для задач цифровой коммуникации, разработки виртуальных ассистентов, образовательных систем и мультимодальных пользовательских интерфейсов. Функциональная схема предлагаемого метода представлена на рис. 1 и включает ряд компонентов, каждый из которых выполняет специализированную задачу в рамках общей последовательности обработки данных.

На вход метод получает бимодальные данные, включающие статичное изображение человека и короткое текстовое сообщение с выраженной эмоцией. Обозначим изображение как $I \in \mathbb{R}^{H\times W\times 3}$, где H и W — высота и ширина изображения. Изображение человека представляет собой фронтальный портрет, на котором отчетливо видны лицо и верхняя часть тела. Оно служит основой для создания цифрового аватара.

На основе исходного изображения выполняется автоматическое определение пола человека. Изображение I подается на вход предобученной модели Φ_{gender} [19], реализованной в рамках библиотеки с открытым исходным кодом DeepFace[1], которая производит классификацию по бинарному признаку пола и возвращает вектор вероятностей принадлежности к классам «мужчина» и «женщина»:

$$\mathbf{g} = \Phi_{gender}(I) = [g_{male}, g_{female}],\ g_{male}, g_{female} \in [0, 1],$$
$$g_{male} + g_{female} = 1.$$

[1] deepface [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://github.com/serengil/deepface, свободный. Яз. англ. (дата обращения: 21.04.2025).

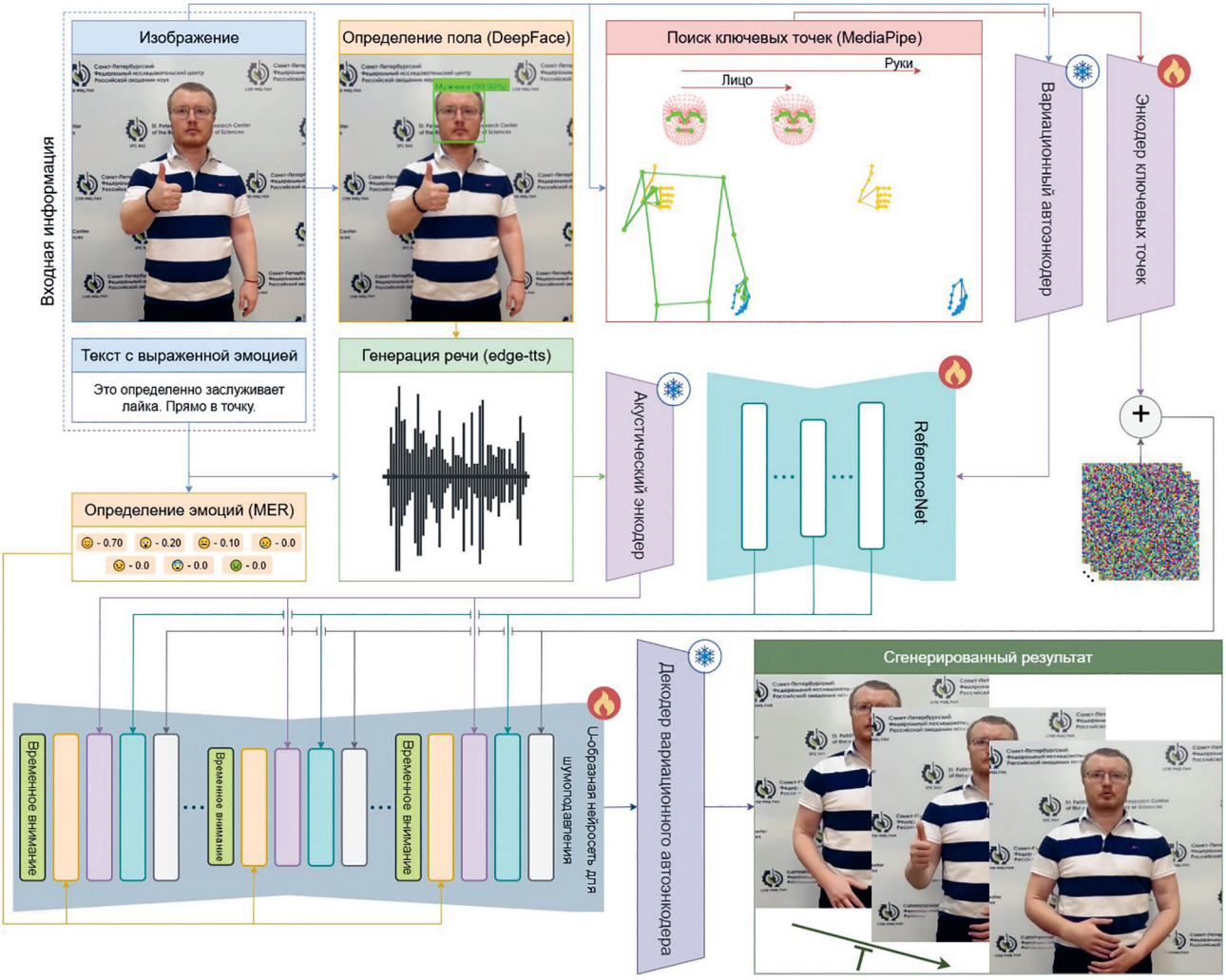


Рис. 1. Функциональная схема предлагаемого метода

Fig. 1. Functional diagram of the proposed method

Таким образом, максимальное значение вектора **g** определяет бинарную метку пола $\hat{y}_{gender} = \text{argmax}(g)$. Значение $\hat{y}_{gender} \in \{male, female\}$ используется для выбора голосового профиля на шаге синтеза речи S, что обеспечивает соответствие между акустической и визуальной модальностями, а также повышает когерентность и реалистичность создаваемого цифрового аватара.

После определения пола, на основе входного изображения I, осуществляется извлечение пространственных ориентиров, необходимых для последующего моделирования артикуляции, мимики и жестов. Для этого используется библиотека с открытым исходным кодом MediaPipe, предоставляющая предобученные модели определения ключевых ориентиров лица [20], рук [21] и тела [22]. Обработка входного изображения I выполняется с помощью предобученной модели[1] $\Phi_{landmarks}$ и возвращает совокупность двувекторного представления позы из 543 двумерных ориентиров, описывающих лицо, руки и тело:

$$\mathbf{L} = \Phi_{landmarks}(I) = \{L^{face}, L^{hands}, L^{pose}\},$$

где $L^{face} = \{(x_i, y_i)\}_{i=1}^{N_f}$ — двумерные координаты $N_f = 468$ ориентиров лица (включая глаза, брови, нос, рот и контур лица); $L^{hands} = \{(x_j, y_j)\}_{j=1}^{2\times N_h}$ — двумерные координаты кистей рук $N_h = 21$ ориентир на каждую руку; $L^{pose} = \{(x_k, y_k)\}_{k=1}^{N_p}$– двумерные координаты $N_p = 33$ ориентиров позы.

Каждая координата ориентира нормирована по размеру исходного изображения I и отражает относительное положение ключевой точки на двумерной сетке. Хотя MediaPipe также возвращает дополнительную компоненту z, описывающую оценку относительной глубины, в рамках предлагаемого метода она не интерпретируется как полноценная пространственная координата, а может использоваться только для эвристической оценки видимости и направленности.

Извлеченные ориентиры **L** представляют собой компактное и согласованное описание визуальной конфигурации, которые подаются в энкодер ключевых точек E_P, генерирующий полную карту позы человека, фиксируя ключевые точки всех частей тела. Эти ориентиры служат базовой позой для цифрового аватара и используются для создания анимации. Однако перед подачей в U-образную нейросеть для шумоподавления (Denoising U-Net) извлеченные ориентиры **L** объединяются с изображениями шума, что помогает улучшить генерацию анимации, за счет более гибкого контроля визуальных характеристик цифрового аватара, а также усилить роль акустического сигнала в управлении артикуляцией и жестами.

Дополнительно исходное изображение I подается на вход вариационного автоэнкодера с дивергенцией Кульбака–Лейблера Φ_{VAE}, реализованного в рамках архитектуры AutoencoderKLMagvit [23], предварительно обученной на крупномасштабных корпусах визуальных анимаций. Несмотря на изначальную ориентацию на обработку видеопоследовательностей, архитектура модели допускает подачу на вход изображения и способна извлекать информативные латентные признаки, отражающие глобальные визуальные характеристики человека. В ходе кодирования осуществляется отображение входного изображения в латентное пространство с последующим получением параметров гауссовского распределения:

$$z_I = \Phi_{VAE}(I) = \mathcal{N}(\mu(I), \sigma^2(I)),$$

где $\mu(I)$ и $\sigma^2(I)$ — параметры латентного распределения, извлекаемые энкодером модели. Извлеченное латентное представление $z_I \in \mathbb{R}^d$, где $d << H \times W$ используется как высокоуровневое описание внешности человека и сохраняется в качестве статического вектора признаков латентного пространства, значительно меньшего по сравнению с размером входного изображения. Такое представление обеспечивает компактное, устойчивое к искажениям кодирование визуального стиля и позволяет сохранить консистентность внешнего вида цифрового аватара на этапах синтеза движений и генерации анимации.

Далее латентное представление z_I, извлеченное исключительно из исходного изображения I, подается в модель усовершенствованной ReferenceNet-ориентированной диффузионной архитектуры [24]. В процессе прохождения через ReferenceNet z_I преобразуется в набор пространственных дескрипторов $f_I = \Phi_{ref}(z_I) \in \mathbb{R}^{C'\times H'\times W'}$, кодирующих высокоуровневые визуальные признаки, такие как форма лица, тела, пальцев рук, прическа, текстура одежды, которые затем внедряются в U-образную нейросеть для шумоподавления. При этом C' — число семантических каналов, каждый кодирует определенный аспект внешнего вида, H' и W' — пространственные размеры (высота и ширина) признакового тензора, которые уменьшаются по сравнению с оригинальным изображением из-за принудительного понижения качества в U-Net. Также важно отметить, что в ReferenceNet не подаются ни акустические признаки, ни представление позы — его задача ограничивается извлечением и сохранением визуального стиля и внешности цифрового аватара.

Второй входной компонент — текстовое сообщение, обозначаемое как $T = \{w_1, w_2, \ldots, w_n\}$, где w_i — отдельное токенизированное слово текста; n — общее количество слов в сообщении. Сообщение представляет собой короткую фразу, включающую как лексическое содержание, так и эмоциональный контекст. Примером может служить утверждение вроде: «Это определенно заслуживает лайка. Прямо в точку.», отражающее позитивную оценку и уверенность говорящего. Текст используется одновременно как основа для генерации синтетической речи и как источник информации об эмоциональном состоянии, которое определяет стиль мимики и жестикуляции в создаваемом видеоконтенте.

Для извлечения эмоциональной составляющей текста применяется адаптированная версия модели из работы [25], сконфигурированная исключительно для текстовой модальности. В исходной архитектуре мето-

[1] MediaPipe Holistic Landmarker [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://ai.google.dev/edge/mediapipe/solutions/vision/holistic_landmarker?hl=ru, свободный. Яз. рус. (дата обращения: 21.04.2025).

да [25] реализован механизм перекрестного модального внимания, позволяющий агрегировать признаки из текстовых, акустических и визуальных модальностей. В рамках настоящей задачи входные аудио- и видеоданные отключаются, а механизм внимания перенастраивается так, чтобы все модальное внимание было сосредоточено на текстовом входе с соответствующей нормализацией весов.

На выходе данной модели формируются два типа результатов. Первый — вектор вероятностей по базовым эмоциям:

$$\mathbf{z_E} = [e_1, e_2, \ldots, e_k] \in \mathbb{R}^k, e_i \in [0,1], \sum_{i=1}^{k} e_i = 1,$$

где каждая компонента e_i отражает степень выраженности эмоции $\ell_i \in \mathcal{L}$; $\mathcal{L} = \{\ell_1, \ell_2, \ldots, \ell_k\}$ — фиксированный список базовых эмоций. В рассматриваемой конфигурации используются 7 эмоций:

$$\mathcal{L} = \left\{ \begin{array}{c} \text{счастье, удивление, нейтральность,} \\ \text{злость, грусть, страх, отвращение} \end{array} \right\}.$$

Такой формат представления эмоционального состояния позволяет избежать жесткой категоризации, характерной для классических классификационных моделей, и обеспечивает более гибкое управление невербальным поведением цифрового аватара. Например, результат $\mathbf{z_E}$ = [0,7; 0,2; 0,1; 0; 0; 0; 0] отражает доминирующую эмоцию счастья (с вероятностью 70 %) с оттенками удивления (20 %) и нейтральности (10 %). Такая интерпретация позволяет учитывать не только основную эмоцию, но и вторичные эмоциональные акценты, что повышает достоверность, выразительность и адаптивность поведений цифрового аватара.

Второй тип результата, формируемый на выходе адаптированной модели, представляет собой скрытое векторное представление текста, обобщающее как семантические, так и эмоциональные признаки. Обозначим его как $\mathbf{z_T} \in \mathbb{R}^d$, где d — размерность эмбеддинга. Вектор $\mathbf{z_T}$ не используется напрямую в качестве выходного признака, а применяется в механизмах управления вниманием к мимике и жестикуляции цифрового аватара. Интеграция вероятностного распределения по эмоциям $\mathbf{z_E}$ с латентным текстовым вектором $\mathbf{z_T}$ позволяет сформировать обогащенное представление эмоционально окрашенного текста, которое передается в U-образную нейросеть для шумоподавления. Данное представление сохраняет структурное и смысловое содержания исходной фразы, одновременно обеспечивая эксплицитную привязку к эмоциональному состоянию. На основе этих признаков метод управляет невербальными компонентами поведения (мимикой, движениями головы, руками и позой). Следующий шаг — генерация синтетической аудиоречи и последующая анимация визуальных характеристик.

Для генерации синтетической аудиоречи на основе исходного текста используется современная технология «текст-в-речь» (Text-to-Speech, TTS) — открытая модель[1], реализующая преобразование текстовой последовательности T в аудиосигнал $A \in \mathbb{R}^l$, где l — длина выходной речевой формы. Обозначим данный процесс как $S(T, \hat{y}_{gender}) \rightarrow A$. В настоящем исследовании метод не учитывает эмоциональные параметры при синтезе речи, но учитывает автоматически определенный пол человека. Таким образом, в данном случае TTS работает в нейтральной просодической конфигурации, поскольку основной акцент делается на визуальном выражении эмоций. Тем не менее, добавление эмоциональной модуляции в TTS является перспективным направлением для дальнейших улучшений реалистичности цифрового аватара. Полученный аудиосигнал используется не только как речевой результат, но и как основа для управления артикуляционными компонентами анимации и подается в предобученный акустический энкодер[2], основанный на архитектуре OWSM-CTC [26], параметры которого заморожены на этапе обучения основной модели. Это позволяет использовать акустический энкодер как устойчивый и обобщенный экстрактор признаков. Результатом обработки является векторное представление $\mathbf{z_A} \in \mathbb{R}^m$, где m — размерность аудиопризнакового пространства, равная 1024. Вектор $\mathbf{z_A}$ содержит информацию об артикуляционных особенностях речи, таких как длительность, интонационные переходы и акустические акценты, и используется исключительно в блоках артикуляционной анимации в компоненте U-образной нейросети для шумоподавления — для управления движениями губ, челюсти и нижней части лица.

Ключевым компонентом предлагаемого метода является генеративная архитектура U-образная нейросеть для шумоподавления, построенная на основе модели Stable Diffusion 3.5 Large[3], адаптированной под задачу генерации видеоконтента с цифровым аватаром. Основная задача данного компонента заключается в восстановлении видеокадров из зашумленных представлений с учетом различных условий, поступающих на вход (поза, пространственные дескрипторы, эмоции, текст и аудио). Процесс генерации осуществляется таким образом, что на каждом временном шаге t модель восстанавливает менее зашумленное латентное представление на основе текущего состояния и всех доступных признаков. Этот процесс можно описать выражением:

$$x_{t-1} = D_\theta(\mathbf{L}, f_I, \mathbf{z_E}, \mathbf{z_T}, \mathbf{z_A}, x_t, t),$$

где x_t — зашумленное латентное представление на шаге t; D_θ — U-образная нейросеть для шумоподавления с параметрами θ.

Модифицированная U-образная нейросеть для шумоподавления организована в виде энкодер-декодера, сохраняя L-уровневую U-образную схему. Энкодер использует последовательность сверточных блоков с операциями понижения разрешения (down-sampling),

[1] edge-tts [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://github.com/rany2/edge-tts, свободный. Яз. англ. (дата обращения: 21.04.2025).

[2] owsm_ctc_v3.2_ft_1B [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://huggingface.co/espnet/owsm_ctc_v3.2_ft_1B, свободный. Яз. англ. (дата обращения: 21.04.2025).

[3] Stable Diffusion 3.5 Large [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://huggingface.co/stabilityai/stable-diffusion-3.5-large, свободный. Яз. англ. (дата обращения: 21.04.2025).

извлекая иерархические пространственные признаки, а декодер восстанавливает детали через операции повышения разрешения (up-sampling) и skip-соединения, которые передают высокочастотные детали из энкодера, критичные для сохранения четкости анимации. Взаимодействие признаков выполняется иерархически. Во-первых, векторные представления позы $\mathbf{L}$ и пространственных дескрипторов f_l подаются на слой линейной модуляции, обеспечивающий адаптивную нормализацию признаков. Во-вторых, вводятся эмоциональные векторы $\mathbf{z_E}$ и текстовый эмбеддинг $\mathbf{z_T}$ исключительно в узловую часть сети, фокусируя наиболее компактное представление на семантике высказывания. Затем, интегрируются аудиопризнаки $\mathbf{z_A}$ на этапах up-sampling, уточняя артикуляцию губ и нижней части лица. Такое разграничение потоков позволяет изолированно контролировать позу, мимику и артикуляцию, снижая взаимные помехи модальностей и улучшая синхронизацию.

Для повышения временной согласованности между соседними кадрами в архитектуру встроены модули временного внимания, которые моделируют краткосрочные зависимости внутри видеопоследовательности. Модуль вычисляет веса взаимодействия $softmax(QK^T)V$ между кадрами через механизм на основе скалярного произведения [27]. На вход подаются линейно спроецированные матрицы запроса Q, ключей K и значений V для исходных признаков. Механизм фокусирует внимание на областях с артефактами, такими как дрожание головы, рук или скачки мимики. Это позволяет устранить визуальные артефакты за счет учета контекста предыдущих и последующих кадров.

Дополнительно реализован механизм согласования модальностей, обеспечивающий совместную обработку информации из различных модальностей (поза, пространственные дескрипторы, эмоции, текст и аудиосигнал). В процессе внимания пространственные дескрипторы используются в роли запросов, а признаки из других модальностей — в роли ключей и значений. Их взаимодействие агрегируется с исходными признаками через остаточное соединение, что позволяет комплексировать разные модальности без потери их информативности.

Благодаря использованию архитектуры Stable Diffusion 3.5 Large в качестве генеративного ядра обеспечивается высокая визуальная детализация, реалистичность текстур лица и тела, а также стабильность визуального потока между кадрами. Выходом является последовательность видеокадров, в которых движения цифрового аватара точно соответствуют содержанию и интонации сгенерированной аудиоречи.

Экспериментальное исследование метода

В ходе проведенных исследований была выполнена комплексная оценка предлагаемого метода генерации анимаций цифровых аватаров, использующего изображение и эмоционально окрашенный текст в качестве входной информации. Оценка охватывала несколько ключевых аспектов, включая визуальное качество сгенерированного видеоконтента, точность синхронизации мимики и речи, а также способность модели достоверно передавать эмоции через жестикуляцию. Исследованы различные конфигурации архитектур и значений гиперпараметров, что позволило определить наиболее значимые компоненты метода для достижения визуально и семантически реалистичных результатов. Кроме того, внимание уделено синхронизации движений тела и жестов в контексте русского жестового языка, что позволяет моделировать коммуникацию как для людей с нарушениями слуха, так и для обычных пользователей. Метод также может генерировать синтетические данные для обучения систем распознавания жестов.

Аппаратные и программные настройки. Все эксперименты выполнялись с использованием высокопроизводительной вычислительной инфраструктуры на базе графических ускорителей NVIDIA A100 с 80 ГБ видеопамяти. Обучение велось в распределенном режиме на 8 GPU, что обеспечивало эффективное масштабирование и стабильную сходимость даже для ресурсоемких моделей, включая ReferenceNet и U-образную нейросеть для шумоподавления. Программная среда была построена на версии Python 3,12 с использованием библиотеки PyTorch 2,4 и поддержки архитектуры Compute Unified Device Architecture. В качестве операционной системы применялась CentOS 7 с ядром Linux, обеспечивающая стабильную и воспроизводимую среду для проведения всех экспериментов. Управление зависимостями и конфигурацией окружения осуществлялось через платформу Docker с зафиксированными начальными значениями генерации (seed).

Используемые корпуса и аннотирование. Для обучения необходимых нейросетевых моделей были задействованы два корпуса, охватывающие разные аспекты визуальной выразительности. Для моделирования жестикуляций применялся корпус русского жестового языка Slovo [28], содержащий 20 400 видео с жестами от 194 участников, представленных в разнообразных контекстах. Для генерации мимики применен корпус VFHQ [29], включающий более 16 000 видео с детализированными лицевыми выражениями в условиях интервью. Оба корпуса были аннотированы с использованием MediaPipe, что обеспечило точное извлечение ключевых ориентиров лица, рук и тела, способствуя синхронизации визуальных компонентов с речью и повышая реалистичность поведения цифровых аватаров. При аннотировании жестов и мимики учитывались особенности русского жестового языка [30, 31], что повысило точность синхронизации.

Параметры обучения и стратегия оптимизации. Обучение компонентов предложенного метода проводилось с использованием тщательно подобранных гиперпараметров и современных стратегий оптимизации, которые были выбраны на основе серии экспериментов для достижения наилучших результатов в плане стабильности сходимости и обобщающей способности всех обучаемых нейросетевых моделей.

Для оптимизации каждой модели использовался адаптивный оптимизатор AdamW с коэффициентом веса регуляризации равным 0,01, что помогло избежать переобучения. Начальная скорость обучения была

установлена на уровне $1 \cdot 10^{-4}$ и адаптивно изменялась с использованием косинусного отжига [32].

При этом первые 5 % шагов (около 20 000 итераций) проходили с фазой линейного разогрева [33], что позволило избежать резкого старта и обеспечило более плавную настройку параметров модели на первых шагах обучения. На финальных этапах обучения применялась техника стохастического усреднения весов [34] с шагом 500 итераций, что также способствовало снижению колебаний и улучшению стабильности предсказаний между эпохами.

В качестве функции потерь использовалась комбинация нескольких методов, адаптированных под специфику каждого компонента метода. Для ReferenceNet была применена комбинированная функция потерь, включающая среднеквадратичную ошибку, и перцептивную потерю согласованности кадров [35], которая измеряла сходство между соседними кадрами, что особенно важно для устойчивости динамических анимаций.

Энкодер ключевых точек был обучен с использованием Mean Absolute Error. Для повышения устойчивости к отсутствующим данным случайным образом исключались 15 % ключевых точек. Это позволило улучшить зависимость модели от других источников данных, таких как акустические и эмоциональные признаки.

После завершения обучения ReferenceNet и энкодера ключевых точек эти компоненты использовались на следующем этапе для обучения U-образной нейросети для шумоподавления. Генеративный компонент U-образной нейросети для шумоподавления применял функцию потерь для предсказания шума, характерную для моделей семейства Stable Diffusion. Размерность латентного пространства была выбрана на основе предварительных экспериментов с архитектурой Stable Diffusion 3.5 Large.

Оценка эффективности метода. Эффективность разработанного метода оценивалась с использованием нескольких количественных метрик, направленных на измерение степени согласованности между синтезированной речью, мимикой и жестами, с учетом эмоциональной окраски текста. Особое внимание уделялось метрикам оценки способности нейросетевой модели передавать эмоции через визуальные проявления, что является ключевым фактором в создании правдоподобных цифровых аватаров. Кроме того, оценивался уровень артефактов, возникающих при генерации — таких как неестественные движения, десинхронизация аудио- и видеосигналов, а также ошибки в лицевой анимации. Наконец оценивались показатели синхронизации и качества визуального ряда, а также интегральные оценки аудиовизуальной согласованности. В таблице приведены результаты оценивания BiMoDiCA и абляционный анализ эффективности компонентов предложенного метода.

Результаты показывают (таблица), что исключение **L** (векторное представление ключевых точек) приводит к умеренному ухудшению визуальных характеристик. Значения метрик FID и FVD выросли с 50,13 до 56,24 и с 601,70 до 630,39 соответственно, а показатели метрик синхронизации артикуляции и согласованности движений несколько снизились. При этом наиболее выраженное ухудшение качества наблюдается при исключении $\mathbf{z_A}$ (векторное представление аудиосигнала), что сопровождается наибольшим ростом FID до 66,83 и FVD до 737,51, а также снижением интегральных метрик синхронизации (Sync-C до 5,141 и CSIM до 0,427). Это подчеркивает ключевую роль акустического энкодера в обеспечении достоверной синхронизации аудиоречи с визуальными проявлениями и мимикой, а также в восприятии эмоциональной окраски. Исключение $\mathbf{z_E}$ (векторное представление эмоций) оказало существенное влияние на способность модели воспроизводить эмоциональные состояния. Рост E-FID с 2,226 до 3,183 и снижение Sync-C с 6,398 до 5,628 свидетельствуют об уменьшении согласованности между эмоциональной окраской текста, синтезированной речью и визуальными проявлениями. Удаление $\mathbf{z_T}$ (векторное представление текста) в большей степени затронуло показатели динамической целостности визуального ряда и синхронизации движений, что проявилось в росте FVD до 685,27 и снижении Sync-C до 5,921, однако влияние на эмоциональные показатели оказалось менее выраженным по сравнению с $\mathbf{z_E}$. Таким образом, результаты

Таблица. Результаты оценивания метода BiMoDiCA
Table. Evaluation results of the BiMoDiCA method

Метрики	BiMoDiCA	Без **L**	Без $\mathbf{z_E}$	Без $\mathbf{z_T}$	Без $\mathbf{z_A}$
FID↓ [36]	50,130	56,240	60,350	58,210	66,830
FVD↓ [36]	601,700	630,390	715,880	685,270	737,510
SSIM↑ [37]	0,752	0,735	0,711	0,723	0,684
PSNR↑ [38]	21,997	21,512	20,678	21,120	19,839
E-FID↓ [39]	2,226	2,461	3,183	2,807	3,556
Sync-D↓ [40]	7,003	7,425	8,486	7,844	9,027
Sync-C↑ [40]	6,398	6,182	5,628	5,921	5,141
HKC↑ [17]	0,912	0,895	0,859	0,880	0,852
HKV↑ [17]	25,020	23,790	21,840	22,570	19,980
CSIM↑ [17]	0,518	0,501	0,466	0,483	0,427

Примечание. ↑ и ↓ — лучшие результаты соответствуют большим и меньшим значениям.

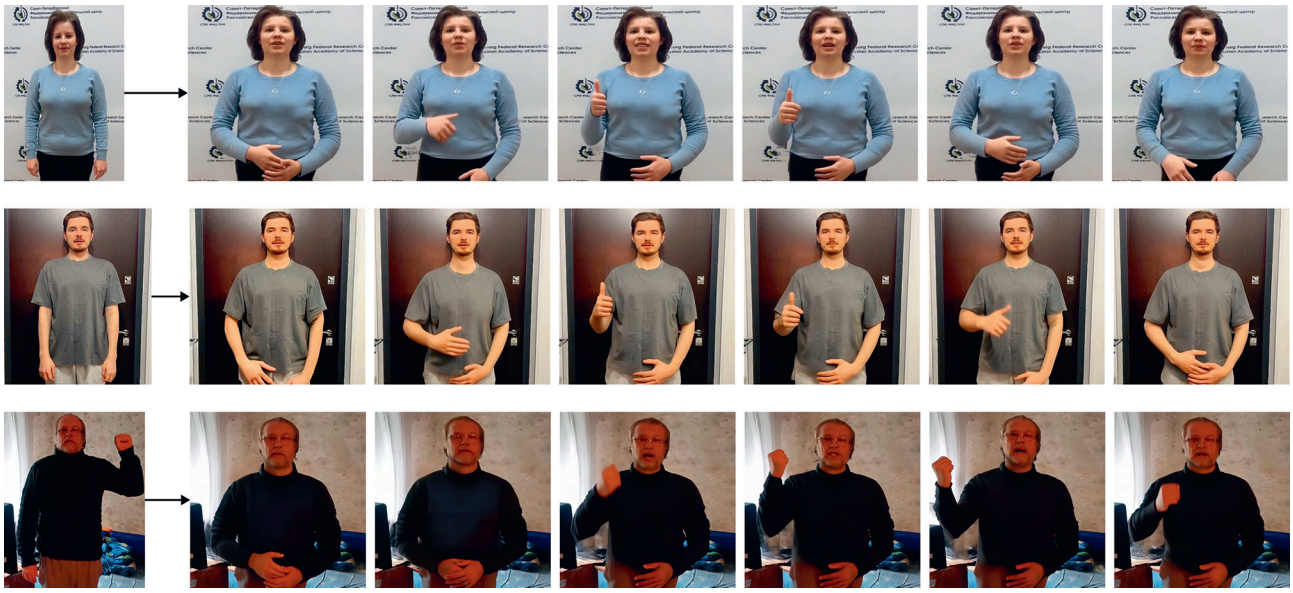


Рис. 2. Примеры ключевых кадров генерации цифровых аватаров

Fig. 2. The following examples are provided to illustrate keyframes in the context of digital avatar generation

абляционного анализа демонстрируют взаимосвязанную структуру компонентов метода и подтверждают, что исключение одного из компонентов приводит к ухудшению эффективности предложенного метода.

На рис. 2 представлены ключевые кадры, иллюстрирующие визуальные результаты генерации цифровых аватаров на основе эмоционального текста и синтезированной речи. Демонстрируется высокая согласованность мимики, жестикуляции и аудиоречи, подтверждающая эффективность предложенного метода. Дополнительные примеры генерации видеоконтента доступны на персональной странице метода[1].

Важно отметить, что в рамках данного исследования акцент был сделан на эмоциональных жестах, характерных для русского жестового языка, а также на интеграции управляющих жестов. Сравнение с аналогичными методами не проводилось, поскольку в существующих научных публикациях нет аналогичных решений, учитывающих синхронизацию эмоций, жестов и речи с учетом особенностей русского жестового языка и управления жестами для умных систем.

Заключение

В данной работе представлен метод генерации анимации цифрового аватара под названием BiMoDiCA с синхронной речевой и невербальной экспрессией на основе бимодального ввода — изображения и эмоционально окрашенного текста. BiMoDiCA основан на диффузионной генеративной архитектуре, интегрирующей акустические, визуальные и аффективные признаки. Такая интеграция обеспечивает реалистичную синхронизацию между речью, артикуляцией, мимикой и жестикуляцией, а также адаптацию поведения аватара в соответствии с эмоциональным контекстом.

Проведенные экспериментальные исследования подтвердили высокую эффективность предлагаемого метода, который показал высокие значения по ряду ключевых метрик: FID (50,13) и FVD (601,70) подтвердили реалистичность видеоконтента и его динамическую устойчивость; SSIM (0,752) и PSNR (21,997) отразили высокое структурное сходство и качество изображения; E-FID (2,226) зафиксировала достоверную передачу эмоционального содержания; метрики синхронизации Sync-D (7,003) и Sync-C (6,398) продемонстрировали согласованность аудиовизуальных данных, в то время как CSIM (0,518) и значения HKC/HKV (0,912/25,02) подтвердили точность поз и вариативность жестов. Эти результаты свидетельствуют о способности метода создавать выразительные и эмоционально насыщенные анимации с высокой степенью когерентности между модальностями.

Особый вклад работы заключается в учете особенностей русского жестового языка при формировании невербальных шаблонов, что расширяет сферу применения метода в инклюзивных системах взаимодействия и аффективно-ориентированных интерфейсах.

Будущие направления исследований включают развитие компонента синтеза речи за счет генерации эмоционально окрашенной и просодически выразительной аудиоречи, устранение артефактов, возникающих на элементах одежды и текстурах при генерации видеоконтента, а также оптимизацию нейросетевых моделей для эффективного внедрения в устройства с ограниченными вычислительными ресурсами. Кроме того, предполагается изучение применения предлагаемого метода в задачах длительного аффективного мониторинга и персонализированного взаимодействия, ориентированного на создание адаптивных, эмоционально чувствительных и эмпатичных цифровых агентов.

[1] BiMoDiCA [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://smil-spcras.github.io/BiMoDiCA, свободный. Яз. рус. (дата обращения: 21.04.2025).

Литература

1. Sincan O.M., Keles H.Y. AUTSL: A Large Scale Multi-Modal Turkish Sign Language Dataset and Baseline Methods // IEEE Access. 2020. V. 8. P. 181340–181355. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3028072
2. Kapitanov A., Kvanchiani K., Nagaev A., Kraynov R., Makhliarchuk A. HaGRID-HAnd Gesture Recognition Image Dataset // Proc. of the Winter Conference on Applications of Computer Vision (WACV). 2024. P. 4560–4569. https://doi.org/10.1109/WACV57701.2024.00451
3. Busso C., Bulut M., Lee C.C., Kazemzadeh A., Mower E., Kim S., Chang J., Lee S., Narayanan S.S. IEMOCAP: interactive emotional dyadic motion capture database // Language Resources and Evaluation. 2008. V. 42. N 4. P. 335–359. https://doi.org/10.1007/s10579-008-9076-6
4. Shen K., Guo C., Kaufmann M., Zarate J., Valentin J., Song J., Hilliges O. X-Avatar: expressive human avatars // Proc. of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2023. P. 16911–16921. https://doi.org/10.1109/CVPR52729.2023.01622
5. Zhang H., Chen B., Yang H., Qu L., Wang X., Chen L., Long C., Zhu F., Du D., Zheng M. AvatarVerse: high-quality and stable 3D avatar creation from text and pose // Proc. of the AAAI Conference on Artificial Intelligence. 2024. V. 38. N 7. P. 7124–7132. https://doi.org/10.1609/aaai.v38i7.28540
6. Kim K., Song B. Robust 3D human avatar reconstruction from monocular videos using depth optimization and camera pose estimation // IEEE Access. 2025. V. 13. P. 57886–57897. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3556445
7. Yuan Y., Li X., Huang Y., De Mello S., Nagano K., Kautz J., Iqbal U. Gavatar: animatable 3D gaussian avatars with implicit mesh learning // Proc. of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2024. P. 896–905. https://doi.org/10.1109/CVPR52733.2024.00091
8. Teotia K., Mallikarjun B.R., Pan X., Kim H., Garrido P., Elgharib M., Theobalt C. HQ3DAvatar: high-quality implicit 3D head avatar // ACM Transactions on Graphics. 2024. V. 43. N 3. P 1–24. https://doi.org/10.1145/3649889
9. Yang L., Zhang Z., Song Y., Hong S., Xu R., Zhao Y., Zhang W., Cui B., Yang M. Diffusion models: a comprehensive survey of methods and applications // ACM Computing Surveys. 2023. V. 56. N 4. P. 1–39. https://doi.org/10.1145/3626235
10. Karras J., Holynski A., Wang T., Kemelmacher-Shlizerman I. DreamPose: fashion image-to-video synthesis via stable diffusion // Proc. of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV). 2023. P. 22623–22633. https://doi.org/10.1109/ICCV51070.2023.02073
11. Huang Z., Tang F., Zhang Y., Cun X., Cao J., Li J., Lee T. Make-Your-Anchor: a diffusion-based 2D avatar generation framework // Proc. of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2024. P. 6997–7006. https://doi.org/10.1109/CVPR52733.2024.00668
12. Blattmann A., Dockhorn T., Kulal S., Mendelevitch D., Kilian M., Lorenz D., Levi Y., English Z., Voleti V., Letts A., Jampani V., Rombach R. Stable video diffusion: scaling latent video diffusion models to large datasets // arXiv. 2023. arXiv:2311.15127. https://doi.org/10.48550/arXiv.2311.15127
13. Zhang L., Rao A., Agrawala M. Adding conditional control to text-to-image diffusion models // Proc. of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV). 2023. P. 3813–3824. https://doi.org/10.1109/ICCV51070.2023.00355
14. Zhuang S., Li K., Chen X., Wang Y., Liu Z., Qiao Y., Wang Y. Vlogger: make your dream a vlog // Proc. of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2024. P. 8806–8817. https://doi.org/10.1109/CVPR52733.2024.00841
15. Xu M., Li H., Su Q., Shang H., Zhang L., Liu C., Wang J., Yao Y., Zhu S. Hallo: hierarchical audio-driven visual synthesis for portrait image animation // arXiv. 2024. arXiv:2406.08801. https://doi.org/10.48550/arXiv.2406.08801
16. Yang S., Li H., Wu J., Jing M., Li L., Ji R., Liang J., Fan H., Wang J. MegActor-Sigma: unlocking flexible mixed-modal control in portrait animation with diffusion transformer // Proc. of the AAAI Conference on Artificial Intelligence. 2025. V.39. N 9. P. 9256–9264. https://doi.org/10.1609/aaai.v39i9.33002

References

1. Sincan O.M., Keles H.Y. AUTSL: A Large Scale Multi-Modal Turkish Sign Language Dataset and Baseline Methods. *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 181340–181355. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3028072
2. Kapitanov A., Kvanchiani K., Nagaev A., Kraynov R., Makhliarchuk A. HaGRID-HAnd Gesture Recognition Image Dataset. *Proc. of the Winter Conference on Applications of Computer Vision (WACV)*. 2024, pp. 4560–4569. https://doi.org/10.1109/WACV57701.2024.00451
3. Busso C., Bulut M., Lee C.C., Kazemzadeh A., Mower E., Kim S., Chang J., Lee S., Narayanan S.S. IEMOCAP: interactive emotional dyadic motion capture database. *Language Resources and Evaluation*, 2008, vol. 42, no. 4, pp. 335–359. https://doi.org/10.1007/s10579-008-9076-6
4. Shen K., Guo C., Kaufmann M., Zarate J., Valentin J., Song J., Hilliges O. X-Avatar: expressive human avatars. *Proc. of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2023, pp. 16911–16921. https://doi.org/10.1109/CVPR52729.2023.01622
5. Zhang H., Chen B., Yang H., Qu L., Wang X., Chen L., Long C., Zhu F., Du D., Zheng M. AvatarVerse: high-quality and stable 3D avatar creation from text and pose. *Proc. of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*, 2024, vol. 38, no. 7, pp. 7124–7132. https://doi.org/10.1609/aaai.v38i7.28540
6. Kim K., Song B. Robust 3D human avatar reconstruction from monocular videos using depth optimization and camera pose estimation. *IEEE Access*, 2025, vol. 13, pp. 57886–57897. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3556445
7. Yuan Y., Li X., Huang Y., De Mello S., Nagano K., Kautz J., Iqbal U. Gavatar: animatable 3D gaussian avatars with implicit mesh learning. *Proc. of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2024, pp. 896–905. https://doi.org/10.1109/CVPR52733.2024.00091
8. Teotia K., Mallikarjun B.R., Pan X., Kim H., Garrido P., Elgharib M., Theobalt C. HQ3DAvatar: high-quality implicit 3D head avatar. *ACM Transactions on Graphics*, 2024, vol. 43, no. 3, pp 1–24. https://doi.org/10.1145/3649889
9. Yang L., Zhang Z., Song Y., Hong S., Xu R., Zhao Y., Zhang W., Cui B., Yang M. Diffusion models: a comprehensive survey of methods and applications. *ACM Computing Surveys*, 2023, vol. 56, no. 4, pp. 1–39. https://doi.org/10.1145/3626235
10. Karras J., Holynski A., Wang T., Kemelmacher-Shlizerman I. DreamPose: fashion image-to-video synthesis via stable diffusion. *Proc. of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV)*, 2023, pp. 22623–22633. https://doi.org/10.1109/ICCV51070.2023.02073
11. Huang Z., Tang F., Zhang Y., Cun X., Cao J., Li J., Lee T. Make-Your-Anchor: a diffusion-based 2D avatar generation framework. *Proc. of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2024, pp. 6997–7006. https://doi.org/10.1109/CVPR52733.2024.00668
12. Blattmann A., Dockhorn T., Kulal S., Mendelevitch D., Kilian M., Lorenz D., Levi Y., English Z., Voleti V., Letts A., Jampani V., Rombach R. Stable video diffusion: scaling latent video diffusion models to large datasets. *arXiv*, 2023, arXiv:2311.15127. https://doi.org/10.48550/arXiv.2311.15127
13. Zhang L., Rao A., Agrawala M. Adding conditional control to text-to-image diffusion models. *Proc. of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV)*, 2023, pp. 3813–3824. https://doi.org/10.1109/ICCV51070.2023.00355
14. Zhuang S., Li K., Chen X., Wang Y., Liu Z., Qiao Y., Wang Y. Vlogger: make your dream a vlog. *Proc. of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2024, pp. 8806–8817. https://doi.org/10.1109/CVPR52733.2024.00841
15. Xu M., Li H., Su Q., Shang H., Zhang L., Liu C., Wang J., Yao Y., Zhu S. Hallo: hierarchical audio-driven visual synthesis for portrait image animation. *arXiv*, 2024, arXiv:2406.08801. https://doi.org/10.48550/arXiv.2406.08801
16. Yang S., Li H., Wu J., Jing M., Li L., Ji R., Liang J., Fan H., Wang J. MegActor-Sigma: unlocking flexible mixed-modal control in portrait animation with diffusion transformer. *Proc. of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*, 2025, vol.39, no. 9, pp. 9256–9264. https://doi.org/10.1609/aaai.v39i9.33002

17. Lin G., Jiang J., Liang C., Zhong T., Yang J., Zheng Y. CyberHost: taming audio-driven avatar diffusion model with region codebook attention // arXiv. 2024. arXiv:2409.01876. https://doi.org/10.48550/arXiv.2409.01876
18. Chen Z., Cao J., Chen Z., Li Y., Ma C. EchoMimic: lifelike audio-driven portrait animations through editable landmark conditions // Proc. of the AAAI Conference on Artificial Intelligence. 2025. V. 39. N 3. P. 2403–2410. https://doi.org/10.1609/aaai.v39i3.32241
19. Serengil S., Özpınar A. A benchmark of facial recognition pipelines and co-usability performances of modules // Bilişim Teknolojileri Dergisi. 2024. V. 17. N 2. P. 95–107. https://doi.org/10.17671/gazibtd.1399077
20. Bazarevsky V., Kartynnik Y., Vakunov A., Raveendran K., Grundmann M. Blazeface: sub-millisecond seural face detection on mobile GPUs // arXiv. 2019. arXiv:1907.05047. https://doi.org/10.48550/arXiv.1907.05047
21. Zhang F., Bazarevsky V., Vakunov A., Tkachenka A., Sung G., Chang C.L., Grundmann M. MediaPipe hands: on-device real-time hand tracking // arXiv. 2020. arXiv:2006.10214. https://doi.org/10.48550/arXiv.2006.10214
22. Bazarevsky V., Grishchenko I., Raveendran K., Zhu T., Zhang F., Grundmann M. BlazePose: on-device real-time body pose tracking // arXiv. 2020. arXiv:2006.10204. https://doi.org/10.48550/arXiv.2006.10204
23. Xu J., Zou X., Huang K., Chen Y., Liu B., Cheng M., Shi X., Huang J. EasyAnimate: a high-performance long video generation method based on transformer Architecture // arXiv. 2024. arXiv:2405.18991. https://doi.org/10.48550/arXiv.2405.18991
24. Hu L. Animate anyone: consistent and controllable image-to-video synthesis for character animation // Proc. of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2024. P. 8153–8163. https://doi.org/10.1109/CVPR52733.2024.00779
25. Ryumina E., Ryumin D., Axyonov A., Ivanko D., Karpov A. Multi-corpus emotion recognition method based on cross-modal gated attention fusion // Pattern Recognition Letters. 2025. V. 190. P. 192–200. https://doi.org/10.1016/j.patrec.2025.02.024
26. Peng Y., Sudo Y., Shakeel M., Watanabe S. OWSM-CTC: an open encoder-only speech foundation model for speech recognition, translation, and language identification // Proc. of the 62nd Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics. 2024. V. 1. P. 10192–10209. https://doi.org/10.18653/v1/2024.acl-long.549
27. Vaswani A., Shazeer N., Parmar N., Uszkoreit J., Jones L., Gomez A., Kaiser L., Polosukhin I. Attention is all you need // Proc. of the Advances in Neural Information Processing Systems 30 (NIPS 2017). 2017. P. 1–11.
28. Kapitanov A., Kvanchiani K., Nagaev A., Petrova E. Slovo: Russian sign language dataset // Lecture Notes in Computer Science. 2023. V. 14253. P. 63–73. https://doi.org/10.1007/978-3-031-44137-0_6
29. Xie L., Wang X., Zhang H., Dong C., Shan Y. VFHQ: a high-quality dataset and benchmark for video face super-resolution // IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2022. P. 657–665. https://doi.org/10.1109/CVPRW56347.2022.00081
30. Kagirov I., Ivanko D., Ryumin D., Axyonov A., Karpov A. TheRuSLan: database of russian sign language // Proc. of the12th Conference on Language Resources and Evaluatio (LREC). 2020. P. 6079–6085.
31. Кагиров И.А., Рюмин Д.А., Аксенов 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
32. Axyonov A., Ryumin D., Ivanko D., Kashevnik A., Karpov A. Audio-visual speech recognition in-the-wild: multi-angle vehicle cabin corpus and attention-based method // Proc. of the 49th IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP). 2024. P. 8195–8199. https://doi.org/10.1109/ICASSP48485.2024.10448048
33. Liu Z. Super Convergence cosine annealing with warm-up learning rate // Proc. of the 2nd International Conference on Artificial Intelligence, Big Data and Algorithms (CAIBDA). 2022. P. 1–7.
34. Wang P., Shen L., Tao Z., He S., Tao D. Generalization analysis of stochastic weight averaging with general sampling // Proc. of the 41st International Conference on Machine Learning (ICML). 2024. P. 51442–51464.
35. Yang H., Zhang Z., Tang H., Qian J., Yang J. ConsistentAvatar: learning to diffuse fully consistent talking head avatar with temporal guidance // Proc. of the 32nd ACM International Conference on

17. Lin G., Jiang J., Liang C., Zhong T., Yang J., Zheng Y. CyberHost: taming audio-driven avatar diffusion model with region codebook attention. *arXiv*, 2024, arXiv:2409.01876. https://doi.org/10.48550/arXiv.2409.01876
18. Chen Z., Cao J., Chen Z., Li Y., Ma C. EchoMimic: lifelike audio-driven portrait animations through editable landmark conditions. *Proc. of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*, 2025, vol. 39, no. 3, pp. 2403–2410. https://doi.org/10.1609/aaai.v39i3.32241
19. Serengil S., Özpınar A. A benchmark of facial recognition pipelines and co-usability performances of modules. *Bilişim Teknolojileri Dergisi*, 2024, vol. 17, no. 2, pp. 95–107. https://doi.org/10.17671/gazibtd.1399077
20. Bazarevsky V., Kartynnik Y., Vakunov A., Raveendran K., Grundmann M. Blazeface: sub-millisecond seural face detection on mobile GPUs. *arXiv*, 2019, arXiv:1907.05047. https://doi.org/10.48550/arXiv.1907.05047
21. Zhang F., Bazarevsky V., Vakunov A., Tkachenka A., Sung G., Chang C.L., Grundmann M. MediaPipe hands: on-device real-time hand tracking. *arXiv*, 2020, arXiv:2006.10214. https://doi.org/10.48550/arXiv.2006.10214
22. Bazarevsky V., Grishchenko I., Raveendran K., Zhu T., Zhang F., Grundmann M. BlazePose: on-device real-time body pose tracking. *arXiv*, 2020, arXiv:2006.10204. https://doi.org/10.48550/arXiv.2006.10204
23. Xu J., Zou X., Huang K., Chen Y., Liu B., Cheng M., Shi X., Huang J. EasyAnimate: a high-performance long video generation method based on transformer Architecture. *arXiv*, 2024, arXiv:2405.18991. https://doi.org/10.48550/arXiv.2405.18991
24. Hu L. Animate anyone: consistent and controllable image-to-video synthesis for character animation. *Proc. of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2024, pp. 8153–8163. https://doi.org/10.1109/CVPR52733.2024.00779
25. Ryumina E., Ryumin D., Axyonov A., Ivanko D., Karpov A. Multi-corpus emotion recognition method based on cross-modal gated attention fusion. *Pattern Recognition Letters*, 2025, vol. 190, pp. 192–200. https://doi.org/10.1016/j.patrec.2025.02.024
26. Peng Y., Sudo Y., Shakeel M., Watanabe S. OWSM-CTC: an open encoder-only speech foundation model for speech recognition, translation, and language identification. *Proc. of the 62nd Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics*, 2024, vol. 1, pp. 10192–10209. https://doi.org/10.18653/v1/2024.acl-long.549
27. Vaswani A., Shazeer N., Parmar N., Uszkoreit J., Jones L., Gomez A., Kaiser L., Polosukhin I. Attention is all you need. *Proc. of the Advances in Neural Information Processing Systems 30 (NIPS 2017)*, 2017, pp. 1–11.
28. Kapitanov A., Kvanchiani K., Nagaev A., Petrova E. Slovo: Russian sign language dataset. *Lecture Notes in Computer Science*, 2023, vol. 14253, pp. 63–73. https://doi.org/10.1007/978-3-031-44137-0_6
29. Xie L., Wang X., Zhang H., Dong C., Shan Y. VFHQ: a high-quality dataset and benchmark for video face super-resolution. *IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2022, pp. 657–665. https://doi.org/10.1109/CVPRW56347.2022.00081
30. Kagirov I., Ivanko D., Ryumin D., Axyonov A., Karpov A. TheRuSLan: database of russian sign language. *Proc. of the12th Conference on Language Resources and Evaluatio (LREC)*, 2020. pp. 6079–6085.
31. Kagirov I., 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
32. Axyonov A., Ryumin D., Ivanko D., Kashevnik A., Karpov A. Audio-visual speech recognition in-the-wild: multi-angle vehicle cabin corpus and attention-based method. *Proc. of the 49th IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP)*, 2024, pp. 8195–8199. https://doi.org/10.1109/ICASSP48485.2024.10448048
33. Liu Z. Super Convergence cosine annealing with warm-up learning rate. *Proc. of the 2nd International Conference on Artificial Intelligence, Big Data and Algorithms (CAIBDA)*, 2022, pp. 1–7.
34. Wang P., Shen L., Tao Z., He S., Tao D. Generalization analysis of stochastic weight averaging with general sampling. *Proc. of the 41st International Conference on Machine Learning (ICML)*, 2024, pp. 51442–51464.
35. Yang H., Zhang Z., Tang H., Qian J., Yang J. ConsistentAvatar: learning to diffuse fully consistent talking head avatar with temporal

Multimedia. 2024. P. 3964–3973. https://doi.org/10.1145/3664647.3680619
36. Unterthiner T., Van Steenkiste S., Kurach K., Marinier R., Michalski M., Gelly S. Towards accurate generative models of video: a new metric and challenges // arXiv. 2018. arXiv:1812.01717. https://doi.org/10.48550/arXiv.1812.01717
37. Wang Z., Bovik A.C., Sheikh H.R., Simoncelli E.P. Image quality assessment: from error visibility to structural similarity // IEEE Transactions on Image Processing. 2004. V. 13. N 4. P. 600–612. https://doi.org/10.1109/TIP.2003.819861
38. Hore A., Ziou D. Image quality metrics: PSNR vs. SSIM // Proc. of the 20th International Conference on Pattern Recognition. 2010. P. 2366–2369. https://doi.org/10.1109/ICPR.2010.579
39. Deng Y., Yang J., Xu S., Chen D., Jia Y., Tong X. Accurate 3D face reconstruction with weakly-supervised learning: from single image to image set // Proc. of the 32nd IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2019. P. 285–295. https://doi.org/10.1109/CVPRW.2019.00038
40. Prajwal K.R., Mukhopadhyay R., Namboodiri V.P., Jawahar C.V. A lip sync expert is all you need for speech to lip generation in the wild // Proc. of the 28th ACM International Conference on Multimedia. 2020. P. 484–492. https://doi.org/10.1145/3394171.3413532

guidance. *Proc. of the 32nd ACM International Conference on Multimedia*, 2024, pp. 3964–3973. https://doi.org/10.1145/3664647.3680619
36. Unterthiner T., Van Steenkiste S., Kurach K., Marinier R., Michalski M., Gelly S. Towards accurate generative models of video: a new metric and challenges. *arXiv*, 2018, arXiv:1812.01717. https://doi.org/10.48550/arXiv.1812.01717
37. Wang Z., Bovik A.C., Sheikh H.R., Simoncelli E.P. Image quality assessment: from error visibility to structural similarity. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2004, vol. 13, no. 4, pp. 600–612. https://doi.org/10.1109/TIP.2003.819861
38. Hore A., Ziou D. Image quality metrics: PSNR vs. SSIM. *Proc. of the 20th International Conference on Pattern Recognition*, 2010, pp. 2366–2369. https://doi.org/10.1109/ICPR.2010.579
39. Deng Y., Yang J., Xu S., Chen D., Jia Y., Tong X. Accurate 3D face reconstruction with weakly-supervised learning: from single image to image set. *Proc. of the 32nd IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2019, pp. 285–295. https://doi.org/10.1109/CVPRW.2019.00038
40. Prajwal K.R., Mukhopadhyay R., Namboodiri V.P., Jawahar C.V. A lip sync expert is all you need for speech to lip generation in the wild. *Proc. of the 28th ACM International Conference on Multimedia*, 2020, pp. 484–492. https://doi.org/10.1145/3394171.3413532

Авторы

Аксёнов Александр Александрович — кандидат технических наук, старший 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

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.e@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

Alexander A. Axyonov — PhD, Senior Researcher, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, 199178, Russian Federation, SC 57203963345, https://orcid.org/0000-0002-7479-2851, axyonov.a@iias.spb.su

Elena V. Ryumina — Junior Researcher, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, 199178, Russian Federation, SC 57220572427, https://orcid.org/0000-0002-4135-6949, ryumina.e@iias.spb.su

Dmitry A. Ryumin — PhD, Senior Researcher, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, 199178, Russian Federation, SC 57191960214, https://orcid.org/0000-0002-7935-0569, ryumin.d@iias.spb.su

Статья поступила в редакцию 24.04.2025
Одобрена после рецензирования 10.06.2025
Принята к печати 25.07.2025

Received 24.04.2025
Approved after reviewing 10.06.2025
Accepted 25.07.2025

Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ
июль–август 2025 Том 25 № 4 http://ntv.ifmo.ru/
SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL OF INFORMATION TECHNOLOGIES, MECHANICS AND OPTICS
Jule–August 2025 Vol. 25 No 4 http://ntv.ifmo.ru/en/
ISSN 2226-1494 (print) ISSN 2500-0373 (online)

doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-4-663-675
УДК 004.056.5

Применение машинного обучения для профилирования устройств Интернета вещей с целью обнаружения вредоносной активности

Даниил Михайлович Легкодымов[1], Дмитрий Сергеевич Левшун[2], Игорь Витальевич Котенко[3]✉

[1] Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация
[2,3] Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук, Санкт-Петербург, 199178, Российская Федерация

[1] danillegk65@gmail.com, https://orcid.org/0009-0002-2874-6632
[2] levshun.d@iias.spb.su, https://orcid.org/0000-0003-1898-6624
[3] ivkote@comsec.spb.ru✉, https://orcid.org/0000-0001-6859-7120

Аннотация

Введение. Защита устройств Интернета вещей представляет собой актуальную и значимую задачу в условиях постоянного увеличения числа подключенных к сети устройств и нарастающей угрозы кибератак. Одним из ключевых решений данной проблемы является профилирование таких устройств с целью повышения уровня безопасности систем, в которых они функционируют. Применение методов машинного обучения является перспективным подходом к решению подобной задачи. В настоящем исследовании представлен подход к профилированию устройств Интернета вещей, направленный на обнаружение вредоносной активности. Представленное решение позволяет обнаруживать сетевые события, которые могут свидетельствовать о наличии кибератак. **Метод.** Сущность метода заключается в создании индивидуальных профилей поведения для каждого устройства Интернета вещей с использованием алгоритмов машинного обучения. Профили создаются на основе анализа сетевого трафика. Модели машинного обучения выполняют задачи классификации и обнаружения аномалий. В работе подробно описаны основные этапы предложенного подхода, которые включают процессы сбора и предварительной обработки данных, выбора и обучения моделей, тестирования и оценки эффективности разработанного решения. **Основные результаты.** В ходе исследования построено 26 профилей устройств на основе набора данных CIC IoT 2022. В исходный набор данных добавлен 21 новый признак. Обновленный набор сбалансирован методами оверсемплинга и андерсемплинга. Для каждого устройства получены сравнительные оценки эффективности моделей Random Forest, XGBoost, CatBoost для задачи обнаружения атак, а также Isolation Forest, Elliptic Envelope, One-Class Support Vector Machine для задачи обнаружения аномалий. Показано, что предложенные в исследовании новые признаки входят в число наиболее информативных. **Обсуждение.** Сравнение полученных результатов с релевантными исследованиями подтвердило применимость предложенного подхода для обеспечения безопасности устройств Интернета вещей и снижения рисков, связанных с их эксплуатацией.

Ключевые слова

поведенческое профилирование устройств, безопасность Интернета вещей, информационная безопасность, алгоритмы машинного обучения, выявление аномальной активности, детектирование сетевых атак

Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 24-71-10095, https://rscf.ru/project/24-71-10095/.

Ссылка для цитирования: Легкодымов Д.М., Левшун Д.С., Котенко И.В. Применение машинного обучения для профилирования устройств Интернета вещей с целью обнаружения вредоносной активности // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2025. Т. 25, № 4. С. 663–675. doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-4-663-675

© Легкодымов Д.М., Левшун Д.С., Котенко И.В., 2025

Leveraging machine learning for profiling IoT devices to identify malicious activities

Daniil M. Legkodymov[1], Dmitry S. Levshun[2], Igor V. Kotenko[3]✉

[1] The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications (SPbSUT), Saint Petersburg, 193232, Russian Federation

[2,3] St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS), Saint Petersburg, 199178, Russian Federation

[1] danillegk65@gmail.com, https://orcid.org/0009-0002-2874-6632

[2] levshun.d@iias.spb.su, https://orcid.org/0000-0003-1898-6624

[3] ivkote@comsec.spb.ru✉, https://orcid.org/0000-0001-6859-7120

Abstract

Protecting IoT devices is a relevant and important task in the context of a constantly increasing number of devices connected to the network and a growing threat of cyberattacks. One of the key solutions to this problem is profiling such devices to increase the security level of the systems in which they operate. The application of machine learning methods represents a promising approach to solving this problem. This study presents a method for profiling Internet of Things (IoT) devices aimed at detecting malicious activity. The proposed solution enables the identification of network events that may indicate the presence of cyberattacks. The essence of the method lies in the creation of individualized behavioral profiles for each IoT device using machine learning algorithms. Profiles are constructed based on the analysis of network traffic. The machine learning models are employed to perform classification and anomaly detection tasks. The study provides a detailed description of the main stages of the proposed approach, including data collection and preprocessing, model selection and training, testing, and evaluation of the effectiveness of the developed solution. In the course of the study, 26 device profiles were constructed using the CIC IoT 2022 dataset. An additional 21 new features were incorporated into the original dataset. The augmented dataset was balanced using oversampling and undersampling techniques. For each device comparative performance evaluations were conducted for Random Forest, XGBoost, and CatBoost models in the context of attack detection as well as for Isolation Forest, Elliptic Envelope, and One-Class Support Vector Machine for anomaly detection. It was demonstrated that the newly proposed features are among the most informative. A comparison of the obtained results with relevant studies confirmed the applicability of the proposed approach for ensuring the security of IoT devices and reducing the risks associated with their operation.

Keywords

device behavioral profiling, IoT security, information security, artificial intelligence, machine learning algorithms, abnormal activity detection, network attack detection

Acknowledgements

The study was supported by the grant of the Russian Science Foundation No. 24-71-10095, https://rscf.ru/en/project/24-71-10095/.

For citation: Legkodymov D.M., Levshun D.S., Kotenko I.V. Leveraging machine learning for profiling IoT devices to identify malicious activities. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2025, vol. 25, no. 4, pp. 663–675 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-4-663-675

Введение

Стремительное развитие сети Интернета вещей (IoT) характеризуется неуклонным увеличением количества подключенных устройств, что открывает существенные перспективы для повышения уровня комфорта и эффективности в разнообразных сферах человеческой деятельности. Согласно экспертным оценкам, к 2025 году их число может превысить 37 млрд[1]. Вместе с тем данная тенденция сопряжена с возрастанием рисков кибербезопасности, поскольку устройства IoT обладают повышенной уязвимостью к атакам. Это обусловлено такими факторами, как ограниченность их вычислительных и энергетических ресурсов, значительная гетерогенность аппаратных и программных платформ, а также сложности в обеспечении своевременного обновления встроенного программного обеспечения [1, 2]. Следовательно, обеспечение адекватного уровня защищенности требует разработки инновационных решений, учитывающих специфические характеристики данных устройств [3, 4]. Применение методов машинного обучения (Machine Learning, ML) для создания систем профилирования выступает одним из перспективных подходов в рассматриваемой области [5].

Профилирование в контексте данной работы — процесс отбора и предобработки трафика IoT-устройств для создания характерного поведенческого сетевого профиля, который используется для обнаружения аномалий и атак с помощью ML-моделей.

Основным недостатком существующих решений в области профилирования IoT-устройств является их сосредоточенность на задаче идентификации типа устройств, в то время как задаче обнаружения вредоносной активности уделяется недостаточно внимания.

Цель работы заключается в разработке и исследовании полноценного подхода к поведенческому профилированию IoT-устройств с использованием методов ML. Подход направлен на эффективное обнаружение вредоносной активности. Для достижения этой цели решается задача создания индивидуальных профилей поведения для различных типов устройств IoT на основе анализа их сетевого трафика, задача разработки и внедрения новых извлекаемых из сетевого трафика

[1] [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/mobility-report/mobility-visualizer, свободный. Яз. англ. (дата обращения: 10.03.2025).

признаков, задача обучения и сравнительной оценки производительности моделей ML с целью классификации и обнаружения аномалий, а также задача определения наиболее значимых признаков для каждого профиля устройства, в том числе оценка вклада предложенных новых признаков.

Ожидается, что полученные результаты могут быть использованы для повышения безопасности информационных систем с IoT-устройствами. В свою очередь, это позволит снизить риски, связанные с киберугрозами, что определяет практическую значимость данной работы.

Анализ существующих работ

Согласно анализу научных работ, основные направления исследований в области профилирования и безопасности IoT-устройств включают: применение ML-методов для обнаружения угроз безопасности [6, 7]; профилирование IoT-устройств в режиме реального времени [6]; улучшение методов аутентификации и контроля доступа в IoT-системах [7]; обеспечение конфиденциальности данных IoT-устройств [8]; применение технологии блокчейн [6]; защита от распределенных атак типа «отказ в обслуживании» и ботнетов [9]; повышение безопасности протоколов связи и внедрение новых [10].

Как правило, при профилировании IoT-устройств исследователи ставят перед собой целый ряд задач. *Идентификация типа устройства* важна для применения настроек безопасности, соответствующих устройству, например, разные настройки необходимы для камер и датчика температуры. *Идентификация экземпляра устройства* позволяет различать экземпляры устройств для возможности применения отдельных механизмов безопасности к каждому конкретному устройству. *Обнаружение новых устройств* выявляет новые устройства, для которых еще не построен поведенческий профиль. *Обнаружение аномального поведения* направлено на применение поведенческих профилей для обнаружения подозрительной активности устройств. *Обнаружение атак* связано с применением поведенческих профилей устройств для обнаружения известной вредоносной активности. При этом в области профилирования и обеспечения безопасности IoT-устройств существует ряд сложностей.

— *Разнообразие устройств*. Данное обстоятельство затрудняет разработку универсальных методов защиты. Учитывая огромное количество IoT-устройств, затруднительно подобрать универсальные наборы признаков для их профилирования [5, 6, 11].
— *Обновление программного обеспечения*. IoT-устройства от небольших производителей зачастую имеют проблемы с обновлением программного обеспечения, что влечет за собой наличие уязвимостей, которые никогда не будут исправлены [6].
— *Обучающие данные*. Сбор обучающих данных для профилирования необходимо осуществлять на протяжении значимого промежутка времени. Это создает дополнительные ограничения для сетей, в которых часто появляются новые IoT-устройства [5].
— *Динамическое поведение устройств*. Обновления IoT-устройств могут привести к потере актуальности их профиля [5, 6].
— *Высокая степень взаимосвязанности*. IoT-устройства взаимодействуют друг с другом и другими системами, создавая высокую степень взаимозависимости [11].
— *Ограниченные возможности защиты*. IoT-устройства часто не имеют базовых средств защиты, таких как межсетевые экраны или системы обнаружения вторжений. Это связано с ограниченностью их ресурсов и особенностями использования таких устройств [5, 6, 11].

Рассмотрим некоторые работы в области обеспечения защиты и профилирования IoT-устройств более подробно.

В [12] разработана система обнаружения вторжений в сетях IoT с использованием ML. Система основана на профилировании IoT-устройств без применения ML и последующей классификации атак с применением данного метода. Разработанная система достигла оценки метрик аккуратности (Accuracy) в 98,35 % и точности (Precision) — 99,31 %.

Многомерный набор данных для профилирования IoT-устройств представлен в работе [13]. Особое внимание авторов уделено созданию ML-модели для определения типа устройства. Эксперименты показали способность ML-моделей классифицировать трафик при решении данной задачи с Accuracy до 98,70 %.

Работа [14] посвящена исследованию применения ML-методов для классификации сетевого трафика. Всего выполнен анализ и сравнение 18 ML-алгоритмов. При этом проведено обучение трех типов ML-моделей, которые определяют: является ли устройство IoT-устройством; тип устройства; экземпляр устройства. Экспериментальная оценка показала преимущество алгоритмов Random Forest (RF) и Decision Tree, Accuracy которых при решении данных задач достигает 99,60 %.

В [15] приведено сравнение системы обнаружения вторжений, основанной на ML-методах, с системой, основанной на сигнатурах. В качестве основного преимущества первой системы выделяется возможность обнаружения ранее неизвестных атак, а также возможность работы на зашифрованном трафике. При этом в работе делается вывод о целесообразности построения гибридных систем обнаружения, сочетающих в себе возможности сигнатурного и эвристических методов анализа.

Подход к идентификации устройств в IoT-сетях на основе методов обучения без учителя предложен в работе [16]. Экспериментальная оценка показала, что предлагаемый подход способен классифицировать IoT-устройства с Accuracy до 96,50 %. В качестве преимуществ подхода выделяются большая гибкость и возможность применения для динамических сетей, где размеченные данные могут быть недоступны.

Анализ работ показал, что профилирование и обеспечение безопасности IoT-устройств — сложная и многоуровневая задача, требующая учета множества факторов. Современные подходы, использующие ML, демонстрируют высокую эффективность. Однако в

области безопасности IoT на основе ML все еще существуют направления, требующие дальнейших исследований и разработок.

Предлагаемый подход

Рассмотрим подход к профилированию IoT-устройств. Предложенный подход охватывает полный цикл работы с данными и моделями ML для решения задач обнаружения аномалий и классификации трафика, начиная со сбора и предобработки подготовки исходных данных, переходя к этапам обучения и последующей валидации ML-моделей. Схема подхода показана на рис. 1, где представлены форматы передаваемых между этапами данных. Между этапами передаются данные в формате библиотеки Packet Capture (PCAP) и Comma Separated Values (CSV).

Этап 1. *Сбор данных*. На данном этапе осуществляется сбор сетевого трафика IoT-устройств в формате библиотеки Packet Capture (PCAP). Такие данные представляют собой детализированное описание сетевого взаимодействия анализируемых устройств. Задачей этапа является запись всех пакетов данных, передаваемых через сеть, что позволяет получить полный набор данных о сетевой активности IoT-устройств.

Этап 2. *Предобработка данных*. Данный этап состоит из четырех основных шагов — извлечение признаков, расстановка меток, форматирование данных, а также оверсемплинг и андерсемплинг.

Шаг 2.1. *Извлечение признаков*. Различные признаки сетевого трафика извлекаются из PCAP-файлов. С полным списком признаков, использованных в процессе экспериментов можно ознакомиться в таблице[1]. Были использованы признаки, приведенные в наборе данных CIC IoT 2022, а также 21 дополнительный признак. Признаки, добавленные в рамках настоящего исследования, представлены в табл. 1.

Шаг 2.2. *Расстановка меток*. Каждому экземпляру трафика присваивается метка, указывающая на имя устройства и характер трафика (легитимный или вредоносный). Эти метки необходимы для обучения ML-моделей и оценки их эффективности. Информация для разметки берется из исходного набора данных — CIC IoT 2022.

Шаг 2.3. *Форматирование данных*. Извлеченные признаки и их метки агрегируются и сохраняются в CSV-файл. Каждая запись итогового файла содержит полный набор признаков, метку названия устройства и типа его трафика. Такой формат удобен для последующего использования в ML-алгоритмах. Пример строки из полученного набора данных можно увидеть на сайте[2].

Шаг 2.4. *Оверсемплинг и андерсемплинг.* Соответствующие методы используются для балансировки представленности классов трафика в наборе данных. Для выбранного набора данных было решено увеличить количество примеров данных в наименее представленных классах до 20 000 с помощью метода Adaptive Synthetic Sampling (ADASYN). В свою очередь, количество примеров данных в других классах уменьшалось с помощью метода Random Under Sampler по следующим правилам: если количество примеров превышало 400 000, то оно уменьшалось до 400 000; если более 200 000 — до 200 000; если более 100 000 — до 100 000; если более 75 000 — до 75 000; если более 40 000 — до 40 000; классы с количеством примеров от 20 000 до 40 000 оставались без изменений. Такой подход позволяет сохранить природу данных, где одни классы трафика представлены больше, чем другие, и в то же время сократить разрыв между наименее и наиболее представленными классами. В свою очередь, это дает возможность ML-моделям более эффективно идентифицировать и обнаруживать все классы трафика.

Этап 3. *Подготовка моделей*. На данном этапе ML-модели обучаются на извлеченных признаках. Обучение реализуется через ключевые шаги: разделение данных, кросс-валидацию, оптимизацию гиперпараметров и финальное обучение моделей.

Шаг 3.1. *Разделение данных*. Из CSV-файлов, созданных на этапе 2, извлекаются данные. При этом в предлагаемом подходе для каждого устройства создается отдельный набор данных, что позволяет учитывать уникальные характеристики трафика каждого IoT-устройства в отдельности.

Шаг 3.2. *Кросс-валидация*. Данные разделяются в соотношении 60/20/20: 60 % данных использовались для обучения, 20 % для валидации и 20 % для финального тестирования моделей. Тестовые данные не известны моделям, а обучающие и валидационные

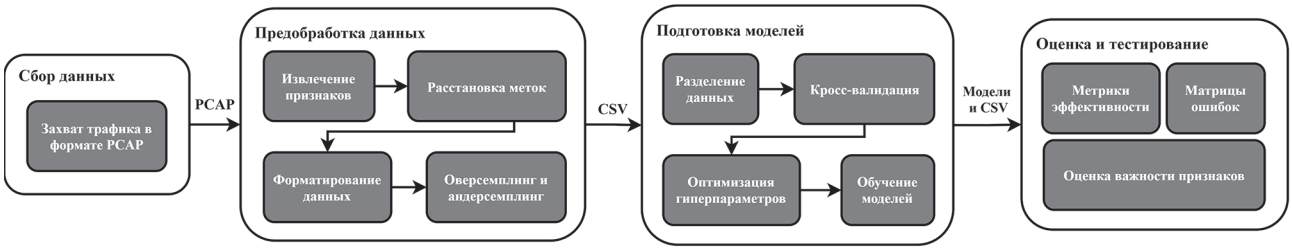


Рис. 1. Подход к обучению ML-моделей для профилирования IoT-устройств

Fig. 1. Approach for training of ML models for profiling IoT devices

[1] [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://github.com/levshun/IoT_profiling/blob/main/Listing.%20Example%20of%20the%20dataset%20row.pdf/ (дата обращения: 20.03.2025).

[2] [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://github.com/levshun/IoT_profiling/blob/main/Table%201.%20List%20of%20features.pdf (дата обращения: 20.03.2025).

Таблица 1. Список добавленных признаков
Table 1. List of the added features

Признак	Описание	Признак	Описание
unique_ip_dst_count	Количество уникальных адресов IP (Internet Protocol) за последние 20 пакетов (как назначения, так и источника)	is_icmp	Является ли пакет ICMP (1 или 0)
unique_ip_src_count	Количество уникальных IP за последние 20 пакетов (как назначения, так и источника)	icmp_type	Тип ICMP
L3_ip	Является ли IP-пакетом (1 или 0)	is_eapol	Является ли пакет EAPOL (1 или 0)
packet_rate	Количество пакетов в секунду	eapol_type	Тип ICMP
number_of_servers	Подсчет количества уникальных IP-адресов серверов для 20 ближайших пакетов	wifi	Тип EAPOL
tcp_window	Размер буфера	wifi_sub_type	Тип Wi-FI
tcp_data_offset	Смещение данных	zigbee	Является ли пакет ZigBee (1 или 0)
NTP (Network Time Protocol)	Является ли пакет NTP (1 или 0)	zigbee_type	Тип ZigBee
ntp_interval	Является ли пакет NTP текущим (1 или 0)	tcp_payload_size	Полезная нагрузка TCP
Domain Name System (DNS)	Является ли пакет DNS (1 или 0)	total_length	Размер всего IP-пакета, включая заголовок и данные
dns_interval	Является ли пакет DNS текущим (1 или 0)		

данные используются для оптимизации их гиперпараметров. Такой подход обеспечивает надежную оценку эффективности моделей, а также проверяет однородность данных.

Шаг 3.3. *Оптимизация гиперпараметров*. Параметры ML-моделей, такие как количество деревьев в RF или выбросов в Isolation Forest (IF), выбираются с помощью метода Random Search.

Шаг 3.4. *Обучение моделей*. ML-модели обучаются с наилучшими значениями гиперпараметров, полученными на шаге 3.3. Для каждого устройства создаются модели, решающие следующие задачи:

— *обнаружение аномалий*. Модель обучается только на легитимных данных, чтобы выявить аномальное поведение устройства на основе его отличий от нормальной активности. Для этой задачи тестировались такие методы, как IF, Elliptic Envelope (EE) и One-Class Support Vector Machine (1-SVM);
— *обнаружение атак*. Модели обучаются на размеченных данных, чтобы идентифицировать известные сценарии нормального и аномального поведения устройств. Для этой задачи тестировались RF, XGBoost (XGB) и CatBoost (CB).

Этап 4. *Оценка и тестирование*. Accuracy, полнота (Recall), Precision и F-мера (F-score) — основные метрики, используемые при оценке эффективности моделей.

Для задачи *обнаружения атак* это означает правильную или неправильную классификацию сетевых событий. В случае задачи обнаружения аномалий, True Positive и False Positive представляют собой корректное и некорректное обнаружение аномального поведения.

Кроме того, для выявления сценариев поведения, в которых ML-модели не справляются с поставленными задачами, в рамках предлагаемого подхода используются расширенные отчеты классификации (Classification Report) и матрицы ошибок (Confusion Matrix). Подобные отчеты и матрицы предоставляют расширенную информацию о производительности ML-моделей на каждом отдельном классе трафика.

Также для объяснения решений ML-моделей используется метод Local Interpretable Model-agnostic Explanations (LIME). Данный метод позволяет определить признаки сетевого трафика, оказывающие наибольшее влияние на отнесение сетевых событий к тому или иному классу, и решает проблему интерпретируемости ML-моделей.

Экспериментальная оценка

Приведем дополнительные сведения об используемом наборе данных, полученных экспериментальных результатах и их анализе.

Набор данных. В данной работе для профилирования IoT-устройств и обнаружения вредоносной активности была использована улучшенная версия набора данных CIC IoT 2022. Этот набор данных включает в себя PCAP-файлы, содержащие как записи трафика атак на устройства, так и сценарии их легитимной работы. Отметим, что перед проведением экспериментов данные были сбалансированы, так как исходный набор данных имеет значительный перевес вредоносного трафика (рис. 2). С полным описанием используемого набора данных можно ознакомиться на сайте[1].

[1] [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://github.com/levshun/IoT_profiling/blob/main/Table%202.%20Description%20of%20the%20dataset.pdf (дата обращения: 20.03.2025).

Рис. 2. Соотношение примеров легитимного и вредоносного трафика

Fig. 2. Ratio of normal and abnormal traffic examples in the dataset before and after balancing

План эксперимента. Для каждого IoT-устройства была произведена оценка производительности 6 ML-моделей для решения следующих задач: *обнаружение атак* — RF, XGB и CB; *обнаружение аномалий* — IF, EE и 1-SVM.

Гиперпараметры ML-моделей были оптимизированы с помощью метода случайного поиска (Random Search). Диапазоны значений проанализированных гиперпараметров представлены в табл. 2.

В процессе экспериментов данные разделялись в соотношении 60/20/20. Это означает, что 60 % данных использовалось для обучения ML-моделей, 20 % для оптимизации их гиперпараметров и валидации, а оставшиеся 20 % не были известны моделям и использовались только для тестирования. Более подробная информация представлена в разделе «Предлагаемый подход».

Результаты. Результаты проведенных экспериментов для пяти устройств представлены в табл. 3. С полным обзором результатов экспериментов для всех 26 устройств можно ознакомиться на сайте[1]. Отметим, что задача обнаружения аномалий решалась только для IoT-устройств с примерами вредоносного трафика.

Значения метрик производительности приведены для ML-моделей с оптимальными значениями гиперпараметров. При этом важно отметить, что каждая из исследованных моделей показала наилучшую производительность по крайней мере для одной задачи одного IoT-устройства: *обнаружение атак*: RF — 8, CB — 14, XGB — 4; обнаружение аномалий: IF — 4, EE — 6, 1-SVM — 1.

В целом, разработанные ML-модели продемонстрировали значительный потенциал, хотя для их адаптации к индустриальным требованиям необходимы дальнейшие усовершенствования и тестирование. Это особенно актуально для задачи *обнаружения аномалий*, где достижение лучших результатов возможно на основе применения моделей глубокого обучения (Deep Learning, DL). По этой причине в рамках дальнейших исследований планируется оценить эффективность DL для той же задачи. При этом основное внимание планируется обратить на тех моделях, которые наиболее эффективны в прогнозировании сетевых событий и обнаружении аномалий в трафике.

[1] [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://github.com/levshun/IoT_profiling/blob/main/Table%204.%20Results%20of%20experiments.pdf (дата обращения: 10.03.2025).

Таблица 2. Анализируемые значения гиперпараметров

Table 2. Analyzed values of the models hyperparameters

Модель	Параметр	Значения	Описание
IF	n_estimators max_features	100, 200, 300, 400, 500 1,0; 0,9; 0,8; 0,7; 0,6; 0,5	Количество деревьев решений, образующих лес. Количество признаков, выбираемых из X для обучения каждого разбиения дерева
EE	support_fraction	None; 0,1; 0,3; 0,5; 0,7; 0,9	Доля точек, включаемых в поддержку оценки Minimum Covariance Determinant
	contamination	0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5	Доля выбросов в наборе данных
1-SVM	kernel	linear, poly, rbf, sigmoid	Тип ядра, используемого в алгоритме
	gamma nu	scale, auto 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5	Коэффициент ядра для rbf, poly и sigmoid. Верхняя граница доли ошибок обучения и нижняя граница доли опорных векторов
RF	n_estimators	100, 200, 300, 400, 500	Количество деревьев, образующих лес
	criterion max_features	gini, entropy, log_loss sqrt, log2	Функция для измерения качества разбиения. Количество признаков, рассматриваемых при поиске лучшего разбиения
CB	iterations	1000, 1500, 2000, 2500, 3000	Максимальное количество деревьев
	learning_rate	0,001; 0,03; 0,1	Скорость обучения
	grow_policy	SymmetricTree, Lossguide	Способ построения деревьев
XGB	n_estimators	100, 200, 300, 400, 500	Максимальное количество деревьев
	learning_rate	0,1; 0,01; 0,001	Скорость обучения
	booster	gbtree, gblinear	Тип бустера

Таблица 3. Результаты экспериментальной оценки
Table 3. Results of the experiments

Устройство	Количество сценариев	Модели	Метрики			
			Accuracy	Precision	Recall	F-score
Amazon Echo Dot	8	RF	0,985	0,985	0,985	0,985
		CB	0,981	0,981	0,981	0,981
		XGB	0,986	0,986	0,986	0,986
Amazon Echo Studio	8	**RF**	0,991	0,991	0,991	0,991
		CB	0,990	0,990	0,990	0,990
		XGB	0,989	0,989	0,989	0,989
ArloQ Camera	9	RF	0,999	0,999	0,999	0,999
		CB	0,999	0,999	0,999	0,999
		XGB	0,999	0,999	0,999	0,999
	2	IF	0,977	0,978	0,977	0,976
		EE	0,704	0,892	0,704	0,753
		1-SVM	0,988	0,988	0,988	0,988
Atomi Coffee Maker	13	**RF**	0,994	0,994	0,994	0,994
		CB	0,993	0,993	0,993	0,993
		XGB	0,993	0,993	0,993	0,993
	2	IF	0,960	0,962	0,960	0,959
		EE	0,976	0,977	0,976	0,976
		1-SVM	0,673	0,821	0,673	0,696
DLink Camera	3	RF	1,000	1,000	1,000	1,000
		CB	1,000	1,000	1,000	1,000
		XGB	1,000	1,000	1,000	1,000

Примечание. Полужирным шрифтом выделены лучшие ML-модели.

Анализ результатов

Для более детального изучения полученных результатов рассмотрим одно из устройств — Philips Hue Bridge. Для данного устройства всего представлено 11 сценариев, два из которых являются вредоносными, а остальные представляют собой легитимную активность. Набор данных для Philips Hue Bridge содержит 980 000 сетевых событий.

Отметим, что подробно рассмотрим результаты только для тех ML-моделей, которые показали лучшие результаты. Согласно табл. 3, для Philips Hue Bridge это CB в задаче обнаружения атак и EE в задаче обнаружения аномалий. Результаты, полученные для каждого класса трафика Philips Hue Bridge, представлены в табл. 4. Матрица ошибок для детектора атак Philips Hue Bridge показана на рис. 3.

Рис. 3 и табл. 4 показывают, что каждый класс трафика устройства идентифицируется эффективно — наименьшее значение F-score показателя составляет 0,997 для сценария легитимной активности ALEXAON. Более того, False Positive и False Negative встречаются только для сценариев нормального трафика, а вредоносных событий, которые были неверно интерпретированы, нет.

Результаты анализа важности признаков представлены на рис. 4. Важность признаков выражена в безразмерных единицах, полученных путем нормализации, что позволяет сравнивать вклад различных признаков. Отметим, что среди 10 лучших признаков присутствуют tcp_window, DNS, packet_rate и NTP, которые были добавлены в данном исследовании при улучшении набора данных CIC IoT 2022.

В табл. 5 представлены результаты обнаружения аномалий для модели EE. Данная ML-модель обучалась только на легитимном трафике IoT-устройства Philips Hue Bridge. Матрица ошибок для задачи обнаружения аномалий показана на рис. 5.

Табл. 5 и рис. 5 показывают, что одно легитимное сетевое событие идентифицируется как вредоносное, а для вредоносных данных 3655 событий были ошибочно определены как легитимные.

Результаты анализа важности признаков с помощью LIME для задачи обнаружения аномалий представлены на рис. 6.

Среди 10 наиболее значимых признаков присутствуют такие, как *total_length*, *DNS*, *NTP*, *dns_interval*, *ntp_interval* и *icmp_type*. Они также были добавлены в настоящей работе при улучшении набора данных CIC IoT 2022. Этот и предыдущий примеры подтверждают, что расширение набора данных признаками, представленными в табл. 3, может улучшить качество профилирования IoT-устройств.

Выполнено сравнение полученных результатов работы с результатами, полученными в других рабо-

Таблица 4. Philips Hue Bridge: результаты классификации
Table 4. Philips Hue Bridge: Classification Report

Сценарий	Количество экземпляров трафика	Метрики			
		Precision	Recall	F-score	Accuracy
Flood_TCP	80 000	1,000	1,000	1,000	0,999
Flood_UDP	80 000	1,000	1,000	1,000	
ALEXAOFF	4000	0,995	0,999	0,997	
ALEXAON	4000	0,999	0,995	0,997	
GOOGLEOFF	4000	0,999	0,999	0,999	
GOOGLEON	4000	0,999	1,000	0,999	
LANOFF	4000	1,000	1,000	1,000	
LANON	4000	1,000	1,000	1,000	
LOCALBUTTON	4000	1,000	1,000	1,000	
WANOFF	4000	0,997	0,999	0,998	
WANON	4000	0,999	0,997	0,998	
macro avg	196 000	0,999	0,999	0,999	
weighted avg	196 000	0,999	0,999	0,999	

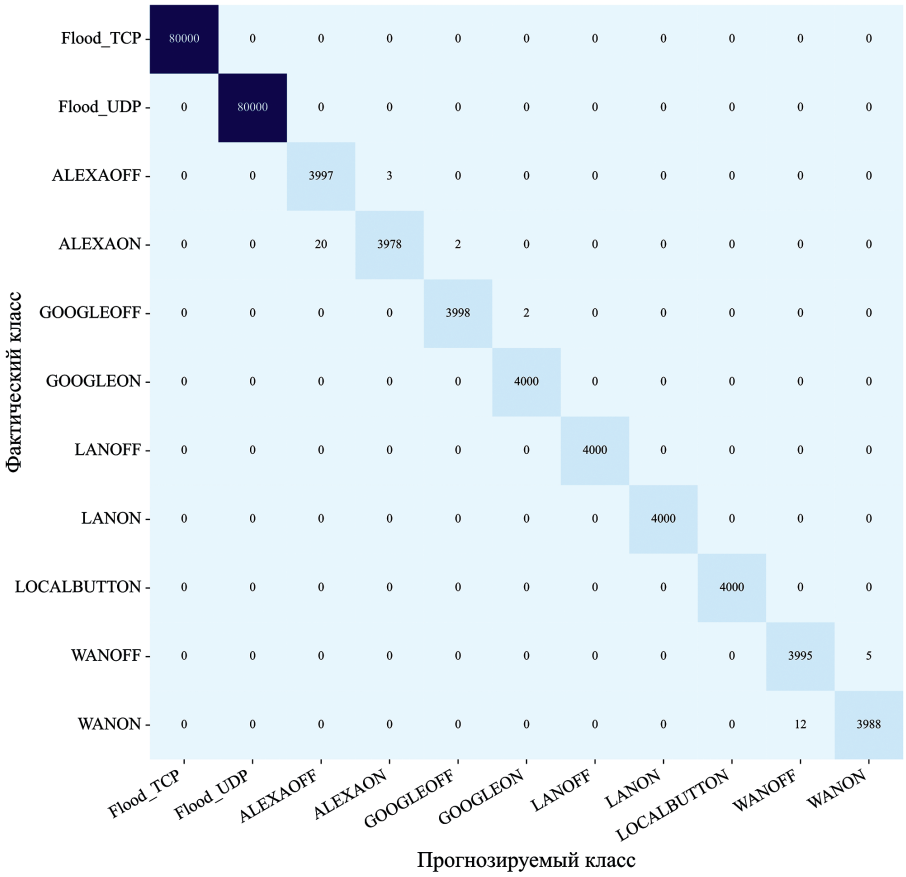


Рис. 3. Philips Hue Bridge: матрица ошибок
Fig. 3. Philips Hue Bridge: Confusion Matrix

тах (табл. 6). При этом важно отметить, что напрямую сравнить результаты, полученные в данной работе, с результатами других исследователей, затруднительно, поскольку использовались различные версии набора данных CIC IoT 2022 [14].

Заметим, что многими исследователями решались задачи, которые не совпадают с теми, что решались в данной работе. В целом, сравнительный анализ показал, что полученные результаты не уступают результатам других исследований. Это подтверждает при-

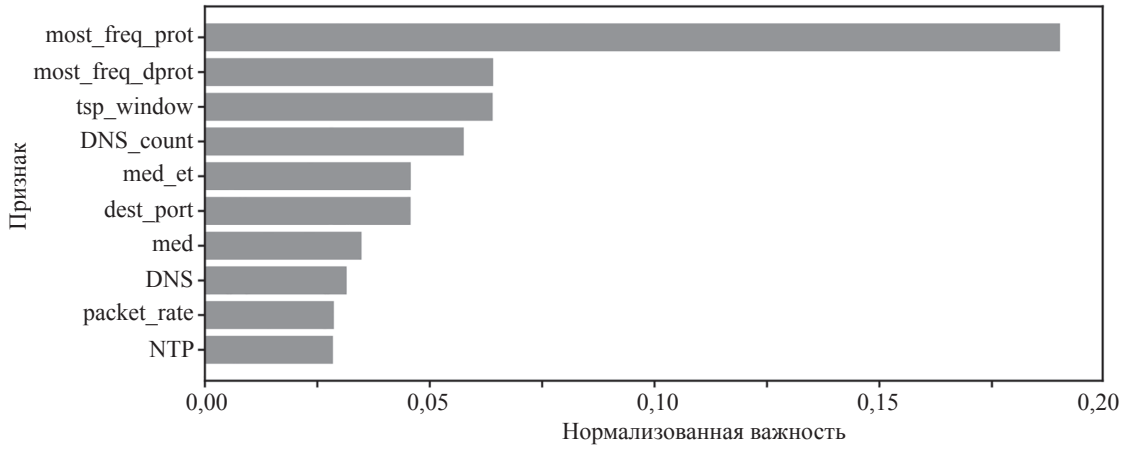


Рис. 4. Philips Hue Bridge: 10 наиболее значимых признаков по 10 000 случайным наблюдениям для модели CatBoost
Fig. 4. Philips Hue Bridge: 10 most significant features for 10,000 random observations for the CatBoost model

Таблица 5. Philips Hue Bridge: результаты реконструкции
Table 5. Philips Hue Bridge: Results of the Reconstruction

Сценарий	Количество экземпляров трафика	Метрики			
		Precision	Recall	F-score	Accuracy
Легитимный	160 000	0,978	0,999	0,989	0,981
Вредоносный	36 000	0,999	0,898	0,947	
macro avg	196 000	0,989	0,949	0,968	
weighted avg	196 000	0,982	0,981	0,981	

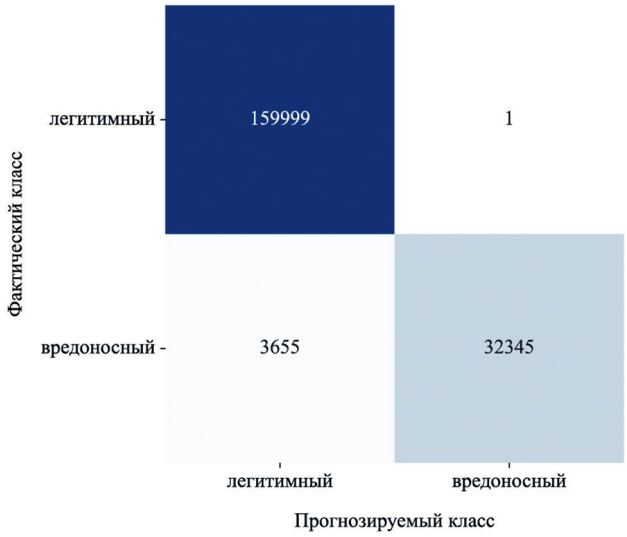


Рис. 5. Philips Hue Bridge: матрица ошибок для модели Elliptic Envelope
Fig. 5. Philips Hue Bridge: error matrix for the Elliptic Envelope model

менимость предлагаемого подхода для обеспечения безопасности IoT-устройств.

Преимуществами выполненного исследования являются несколько ключевых факторов. Реализованная предобработка данных эффективно решает задачи извлечения признаков и нормализации, что обеспечивает подготовку высококачественных наборов. Обучение моделей в большинстве случаев демонстрирует высокую эффективность при решении задач обнаружения атак и аномалий. Кроме того, предложенный подход обеспечивает наглядное представление результатов, включая расширенные отчеты о классификации, матрицы ошибок, визуализацию значимости признаков, а также определение ключевых показателей эффективности.

Отметим, что наличие таких данных позволяет упростить интерпретацию данных от ML-моделей и принимать более обоснованные решения по управ-

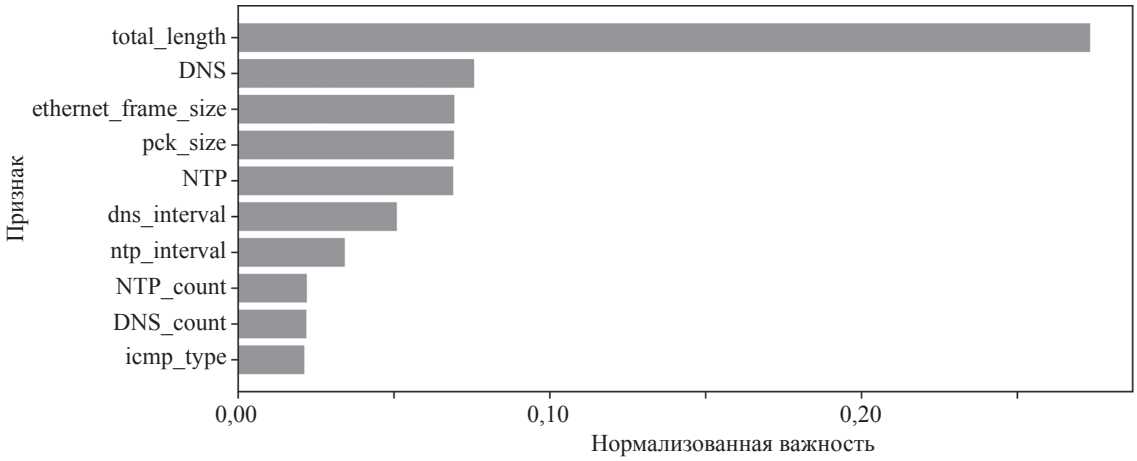


Рис. 6. Philips Hue Bridge: 10 наиболее значимых признаков по 10 000 случайным наблюдениям для модели Elliptic Envelope
Fig. 6. Philips Hue Bridge: 10 most significant features for 10,000 random observations for the Elliptic Envelope

Таблица 6. Сравнение с аналогами
Table 6. Comparison

Ссылка на источник	Данные	Подход	Модель	Метрики				Тип
				Accuracy	Precision	Recall	F-score	
[17]	CIC IoT 2022	Одна модель для всех устройств	FFNN	0,9993	0,9993	0,9993	0,9993	Max
			LSTM	0,9989	0,9989	0,9989	0,9989	Max
			RandNN	0,9642	0,9642	0,9642	0,9642	Max
[18]	CIC IoT 2022	Одна модель для всех устройств	YaTC	0,9658	—	—	0,9658	Max
	ISCXTor2016			0,9972	—	—	0,9972	Max
[19]	CIC IoT 2023	Одна модель для всех устройств	non-ML (IoT-PRIDS)	0,9874	0,9384	0,9971	0,9529	Max
[20]	CIC IoT 2023	Одна модель для всех устройств	EnsAdp CIDS	0,9893	0,9950	0,9940	0,9945	Max
	CICIDS-2017			0,9977	0,9982	0,9986	0,9978	Max
[21]	CIC IoT 2023	Одна модель для всех устройств	2-class RF	0,9955	0,9955	0,9955	0,9955	Max
			34-class RF	0,9633	0,9628	0,9633	0,9626	Max
[22]	CIC IoT 2023	Одна модель для всех устройств	Ensemble Learning Boosting (LR, NB, SVM, KNN, MLP)	0,9319	0,9353	0,9319	0,9324	Max
	Edge-IIoTset 2023			0,9601	0,9606	0,9601	0,9594	Max
[23]	IoTID20	Одна модель для всех устройств	RF	0,9868	—	—	—	Max
			XGB	0,9867	—	—	—	Max
			Extra Tree	0,9845	—	—	—	Max
Настоящая работа	CIC IoT 2022 (расширенная версия)	Отдельные модели для каждого устройства	Anomaly detection (IF, EE, 1-SVM)	0,9940	0,9940	0,9940	0,9930	Max
				0,9549	0,9568	0,9549	0,9547	Avg
				0,7720	0,7740	0,7720	0,7720	Min
			Attack detection (RF, XGB, CB)	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	Max
				0,9880	0,9880	0,9880	0,9880	Avg
				0,9270	0,9270	0,9270	0,9270	Min

лению безопасностью сети с IoT-устройствами. Что касается проблем, которые необходимо решить для улучшения предлагаемого подхода, то можно выделить следующие: эффективность моделей сильно зависит от качества и объема исходных данных, что может потребовать дополнительных усилий по сбору и предварительной обработке информации; существует необходимость дальнейшей оптимизации и тестирования для адаптации системы к индустриальным требованиям и повышения ее производительности.

Заключение

В работе представлен подход к профилированию устройств Интернета вещей (IoT) с целью обнаружения вредоносной активности. Данный подход работает с сетевой активностью устройств и анализирует их поведение с помощью моделей машинного обучения (Machine Learning, ML). Основой анализа служит сетевой трафик, используемый для выявления аномального поведения и обнаружения кибератак.

В процессе исследования был улучшен и расширен открытый набор данных сетевого трафика IoT-устройств. В процессе расширения были обработаны PCAP-файлы, соответствующие легитимным и вредоносным сценариям IoT-устройства. Также были использованы как признаки трафика из оригинального набора данных, так и добавлены новые признаки. Кроме того, в набор были добавлены синтетические данные, чтобы решить проблему дисбаланса для недостаточно представленных сценариев поведения каждого устройства.

Задача идентификации вредоносной активности была разделена на две подзадачи: обнаружение аномалий и обнаружение атак. Для этого ML-реконструкторы обучались только на легитимном трафике каждого устройства (профиль нормального поведения) и затем использовались для прогнозирования аномалий. ML-классификаторы обучались для каждого устройства отдельно как на легитимном, так и вредоносном трафике (общий профиль поведения). Задача данных моделей — идентифицировать, какое легитимное (тип сценария работы устройства) или вредоносное (тип атаки на устройство) поведение представляет собой трафик.

В ходе экспериментов были созданы профили для 26 IoT-устройств. Для каждого устройства, где имеется трафик вредоносной активности, были отобраны наиболее эффективные ML-реконструктор (обнаружение аномалий) и ML-классификатор (обнаружение атак). Для остальных устройств был отобран только ML-классификатор.

Для каждого устройства выполнено сравнение эффективности Random Forest, XGBoost и CatBoost в задаче обнаружения атак, а также Isolation Forest, Elliptic Envelope и One Class Support Vector Machine в задаче обнаружения аномалий (где это было возможно).

На основании полученных результатов можно дать следующие рекомендации по дальнейшему развитию и применению полученных результатов: расширение набора данных (больше устройств и сценариев); разработка дополнительных методов предобработки данных; расширение наборов гиперпараметров для оптимизации; интеграция с другими моделями и алгоритмами; расширение функциональности системы; адаптация к новым угрозам. В ходе дальнейших исследований планируется сосредоточиться на разработке адаптивных методов защиты, многофакторном профилировании, повышении отказоустойчивости системы и других аспектах, связанных с обеспечением безопасности систем с IoT-устройствами. Это позволит улучшить защиту от киберугроз, минимизировать риски несанкционированного доступа, повысить эффективность управления и мониторинга в условиях динамически меняющихся угроз и требований.

Литература

1. Левшун Д.С., Гайфулина Д.А., Чечулин А.А., Котенко И.В. Проблемные вопросы информационной безопасности киберфизических систем // Информатика и автоматизация. 2020. Т. 19. № 5. С. 1050–1088. https://doi.org/10.15622/ia.2020.19.5.6
2. Levshun D.S., Chechulin A.A., Kotenko I.V. Design lifecycle for secure cyber-physical systems based on embedded devices // Proc. of the 9th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS). 2017. P. 277–282. https://doi.org/10.1109/IDAACS.2017.8095090
3. Levshun D., Chechulin A., Kotenko I., Chevalier Y. Design and verification methodology for secure and distributed cyber-physical systems // Proc. of the 10th IFIP International Conference on New Technologies, Mobility and Security (NTMS). 2019. P. 1–5. https://doi.org/10.1109/NTMS.2019.8763814
4. Levshun D., Chechulin A., Kotenko I. A technique for design of secure data transfer environment: Application for I2C protocol // Proc. of the IEEE Industrial Cyber-Physical Systems (ICPS). 2018. P. 789–794. https://doi.org/10.1109/ICPHYS.2018.8390807
5. Rose J.R., Swann M., Bendiab G., Shiaeles S., Kolokotronis N. Intrusion detection using network traffic profiling and machine learning for IoT // Proc. of the. 7th International Conference on Network Softwarization (NetSoft). 2021. P. 409–415. https://doi.org/10.1109/NetSoft51509.2021.9492685
6. Safi M., Dadkhah S., Shoeleh F., Mahdikhani H., Molyneaux H., Ghorbani A.A. A survey on IoT profiling, fingerprinting, and identification // ACM Transactions on Internet of Things. 2022. V. 3. N 4. P. 1–39. https://doi.org/10.1145/3539736
7. Ahmed K.I., Tahir M., Habaebi M.H., Lau S.L., Ahad A. Machine learning for authentication and authorization in iot: Taxonomy,

References

1. Levshun D., Gaifulina D., Chechulin A., Kotenko I. Problematic issues of information security of cyber-physical systems. *Informatics and Automation*, 2020, vol. 19, no. 5, pp. 1050–1088. (in Russian). https://doi.org/10.15622/ia.2020.19.5.6
2. Levshun D.S., Chechulin A.A., Kotenko I.V. Design lifecycle for secure cyber-physical systems based on embedded devices. *Proc. of the 9th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS)*, 2017, pp. 77–282. https://doi.org/10.1109/IDAACS.2017.8095090
3. Levshun D., Chechulin A., Kotenko I., Chevalier Y. Design and verification methodology for secure and distributed cyber-physical systems. *Proc. of the 10th IFIP International Conference on New Technologies, Mobility and Security (NTMS)*, 2019, pp. 1–5. https://doi.org/10.1109/NTMS.2019.8763814
4. Levshun D., Chechulin A., Kotenko I. A technique for design of secure data transfer environment: Application for I2C protocol. *Proc. of the IEEE Industrial Cyber-Physical Systems (ICPS)*, 2018, pp. 789–794. https://doi.org/10.1109/ICPHYS.2018.8390807
5. Rose J.R., Swann M., Bendiab G., Shiaeles S., Kolokotronis N. Intrusion detection using network traffic profiling and machine learning for IoT. *Proc. of the. 7th International Conference on Network Softwarization (NetSoft)*, 2021, pp. 409–415. https://doi.org/10.1109/NetSoft51509.2021.9492685
6. Safi M., Dadkhah S., Shoeleh F., Mahdikhani H., Molyneaux H., Ghorbani A.A. A survey on IoT profiling, fingerprinting, and identification. *ACM Transactions on Internet of Things*, 2022, vol. 3, no. 4, pp. 1–39. https://doi.org/10.1145/3539736
7. Ahmed K.I., Tahir M., Habaebi M.H., Lau S.L., Ahad A. Machine learning for authentication and authorization in iot: Taxonomy,

challenges and future research direction // Sensors. 2021. V. 21. N 15. P. 5122. https://doi.org/10.3390/s21155122
8. Wójcicki K., Biegańska M., Paliwoda B., Górna J. Internet of things in industry: research profiling, application, challenges and opportunities — a review // Energies. 2022. V. 15. N 5. P. 1806. https://doi.org/10.3390/en15051806
9. Nguyen G.L., Dumba B., Ngo Q.D., Le H.V., Nguyen T.N. A collaborative approach to early detection of IoT Botnet // Computers & Electrical Engineering. 2022. V. 97. P. 107525. https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2021.107525
10. Bansal M., Priya. Performance comparison of MQTT and CoAP protocols in different simulation environments // Lecture Notes in Networks and Systems. 2021. V. 145. P. 549–560. https://doi.org/10.1007/978-981-15-7345-3_47
11. Canavese D., Mannella L., Regano L., Basile C. Security at the edge for resource-limited IoT devices // Sensors. 2024. V. 24. N 2. P. 590. https://doi.org/10.3390/s24020590
12. Rose J.R., Swann M., Bendiab G., Shiaeles S., Kolokotronis N. Intrusion detection using network traffic profiling and machine learning for IoT // Proc. of the 7th International Conference on Network Softwarization (NetSoft). 2021. P. 409–415. https://doi.org/10.1109/NetSoft51509.2021.9492685
13. Dadkhah S., Mahdikhani H., Danso P.K., Zohourian A., Truong K.A., Ghorbani A.A. Towards the development of a realistic multidimensional IoT profiling dataset // Proc. of the 19th Annual International Conference on Privacy, Security & Trust (PST). 2022. P. 1–11. https://doi.org/10.1109/PST55820.2022.9851966
14. Safi M., Kaur B., Dadkhah S., Shoeleh F., Lashkari A.H., Molyneaux H., Ghorbani A.A. Behavioural monitoring and security profiling in the internet of things (IoT) // Proc. of the IEEE 23rd International Conference on High Performance Computing and Communications 7th International Conference on Data Science and Systems 19th International Conference on Smart City and 7th International Conference on Dependability in Sensor Cloud and Big Data Systems and Applications HPCC/DSS/Smartcity/Dependsys. 2021. P. 1203–1210. https://doi.org/10.1109/HPCC-DSS-SMARTCITY-DEPENDSYS53884.2021.00185
15. Гетьман А.И., Горюнов М.Н., Мацкевич А.Г., Рыболовлев Д.А. Сравнение системы обнаружения вторжений на основе машинного обучения с сигнатурными средствами защиты информации // Труды Института системного программирования РАН. 2022. Т. 34. № 5. С. 111–126. https://doi.org/10.15514/ISPRAS-2022-34(5)-7
16. Koball C., Rimal B.P., Wang Y., Salmen T., Ford C. IoT device identification using unsupervised machine learning // Information. 2023. V. 14. N 6. P. 320. https://doi.org/10.3390/info14060320
17. Bakhsh S.A., Khan M.A., Ahmed F., Alshehri M.S., Ali H., Ahmad J. Enhancing IoT network security through deep learning-powered Intrusion Detection System // Internet of Things. 2023. V. 24. P. 100936. https://doi.org/10.1016/j.iot.2023.100936
18. Zhao R., Zhan M., Deng X., Wang Y., Wang Y., Gui G., Xue Z. Yet another traffic classifier: A masked autoencoder based traffic transformer with multi-level flow representation // Proc. of the 37th AAAI Conference on Artificial Intelligence. 2023. V. 37. N 4. P. 5420–5427. https://doi.org/10.1609/aaai.v37i4.25674
19. Zohourian A., Dadkhah S., Molyneaux H., Neto E.C.P., Ghorbani A.A. IoT-PRIDS: Leveraging packet representations for intrusion detection in IoT networks // Computers & Security. 2024. V. 146. P. 104034. https://doi.org/10.1016/j.cose.2024.104034
20. Roshan K., Zafar A. Ensemble adaptive online machine learning in data stream: a case study in cyber intrusion detection system // International Journal of Information Technology. 2024. V. 16. N 8. P. 5099–5112. https://doi.org/10.1007/s41870-024-01727-y
21. Khan M.M., Alkhathami M. Anomaly detection in IoT-based healthcare: machine learning for enhanced security // Scientific Reports. 2024. V. 14. N 1. P. 5872. https://doi.org/10.1038/s41598-024-56126-x
22. Jeffrey N., Tan Q., Villar J.R. Using ensemble learning for anomaly detection in cyber–physical systems // Electronics. 2024. V. 13. N 7. P. 1391. https://doi.org/10.3390/electronics13071391
23. Bajpai S., Sharma K., Chaurasia B.K. Intrusion detection framework in IoT networks // SN Computer Science. 2023. V. 4. N 4. P. 350. https://doi.org/10.1007/s42979-023-01770-9

challenges and future research direction. *Sensors*, 2021, vol. 21, no. 15, pp. 5122. https://doi.org/10.3390/s21155122
8. Wójcicki K., Biegańska M., Paliwoda B., Górna J. Internet of things in industry: research profiling, application, challenges and opportunities — a review. *Energies*, 2022, vol. 15, no. 5, pp. 1806. https://doi.org/10.3390/en15051806
9. Nguyen G.L., Dumba B., Ngo Q.D., Le H.V., Nguyen T.N. A collaborative approach to early detection of IoT Botnet. *Computers & Electrical Engineering*, 2022, vol. 97, pp. 107525. https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2021.107525
10. Bansal M., Priya. Performance comparison of MQTT and CoAP protocols in different simulation environments. *Lecture Notes in Networks and Systems*, 2021, vol. 145, pp. 549–560. https://doi.org/10.1007/978-981-15-7345-3_47
11. Canavese D., Mannella L., Regano L., Basile C. Security at the edge for resource-limited IoT devices. *Sensors*, 2024, vol. 24, no. 2, pp. 590. https://doi.org/10.3390/s24020590
12. Rose J.R., Swann M., Bendiab G., Shiaeles S., Kolokotronis N. Intrusion detection using network traffic profiling and machine learning for IoT. *Proc. of the 7th International Conference on Network Softwarization (NetSoft)*, 2021, pp. 409–415. https://doi.org/10.1109/NetSoft51509.2021.9492685
13. Dadkhah S., Mahdikhani H., Danso P.K., Zohourian A., Truong K.A., Ghorbani A.A. Towards the development of a realistic multidimensional IoT profiling dataset. *Proc. of the 19th Annual International Conference on Privacy, Security & Trust (PST)*, 2022, pp. 1–11. https://doi.org/10.1109/PST55820.2022.9851966
14. Safi M., Kaur B., Dadkhah S., Shoeleh F., Lashkari A.H., Molyneaux H., Ghorbani A.A. Behavioural monitoring and security profiling in the internet of things (IoT). *Proc. of the IEEE 23rd International Conference on High Performance Computing and Communications 7th International Conference on Data Science and Systems 19th International Conference on Smart City and 7th International Conference on Dependability in Sensor Cloud and Big Data Systems and Applications HPCC/DSS/Smartcity/Dependsys*, 2021, pp. 1203–1210. https://doi.org/10.1109/HPCC-DSS-SMARTCITY-DEPENDSYS53884.2021.00185
15. Getman A.I., Goryunov M.N., Matskevich A.G., Rybolovlev D.A. A comparison of a machine learning-based intrusion detection system and signature-based systems. *Proceedings of the Institute for System Programming of the RAS (Proceedings of ISP RAS)*, 2022, vol. 34, no. 5, pp. 111–126. (in Russian). https://doi.org/10.15514/ISPRAS-2022-34(5)-7
16. Koball C., Rimal B.P., Wang Y., Salmen T., Ford C. IoT device identification using unsupervised machine learning. *Information*, 2023, vol. 14, no. 6, pp. 320. https://doi.org/10.3390/info14060320
17. Bakhsh S.A., Khan M.A., Ahmed F., Alshehri M.S., Ali H., Ahmad J. Enhancing IoT network security through deep learning-powered Intrusion Detection System. *Internet of Things*, 2023, vol. 24, pp. 100936. https://doi.org/10.1016/j.iot.2023.100936
18. Zhao R., Zhan M., Deng X., Wang Y., Wang Y., Gui G., Xue Z. Yet another traffic classifier: A masked autoencoder based traffic transformer with multi-level flow representation. *Proc. of the 37th AAAI Conference on Artificial Intelligence*, 2023, vol. 37, no. 4, pp. 5420–5427. https://doi.org/10.1609/aaai.v37i4.25674
19. Zohourian A., Dadkhah S., Molyneaux H., Neto E.C.P., Ghorbani A.A. IoT-PRIDS: Leveraging packet representations for intrusion detection in IoT networks. *Computers & Security*, 2024, vol. 146, pp. 104034. https://doi.org/10.1016/j.cose.2024.104034
20. Roshan K., Zafar A. Ensemble adaptive online machine learning in data stream: a case study in cyber intrusion detection system. *International Journal of Information Technology*, 2024, vol. 16, no. 8, pp. 5099–5112. https://doi.org/10.1007/s41870-024-01727-y
21. Khan M.M., Alkhathami M. Anomaly detection in IoT-based healthcare: machine learning for enhanced security. *Scientific Reports*, 2024, vol. 14, no. 1, pp. 5872. https://doi.org/10.1038/s41598-024-56126-x
22. Jeffrey N., Tan Q., Villar J.R. Using ensemble learning for anomaly detection in cyber–physical systems. *Electronics*, 2024, vol. 13, no. 7, pp. 1391. https://doi.org/10.3390/electronics13071391
23. Bajpai S., Sharma K., Chaurasia B.K. Intrusion detection framework in IoT networks. *SN Computer Science*, 2023, vol. 4, no. 4, pp. 350. https://doi.org/10.1007/s42979-023-01770-9

Авторы

Легкодымов Даниил Михайлович — студент, Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация, SC 59721499100, https://orcid.org/0009-0002-2874-6632, danillegk65@gmail.com

Левшун Дмитрий Сергеевич — кандидат технических наук (Россия), PhD (Франция), старший научный сотрудник, Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук, Санкт-Петербург, 199178, Российская Федерация, SC 57189306576, https://orcid.org/0000-0003-1898-6624, levshun.d@iias.spb.su

Котенко Игорь Витальевич — доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки Российской Федерации, главный научный сотрудник, Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук, Санкт-Петербург, 199178, Российская Федерация, SC 15925268000, https://orcid.org/0000-0001-6859-7120, ivkote@comsec.spb.ru

Authors

Daniil M. Legkodymov — Student, The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications (SPbSUT), Saint Petersburg, 193232, Russian Federation, SC 59721499100, https://orcid.org/0009-0002-2874-6632, danillegk65@gmail.com

Dmitry S. Levshun — PhD (Russia), PhD (France), Senior Researcher, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS), Saint Petersburg, 199178, Russian Federation, SC 57189306576, https://orcid.org/0000-0003-1898-6624, levshun.d@iias.spb.su

Igor V. Kotenko — D.Sc., Professor, Honored Scientist of the Russian Federation, Chief Researcher, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS), Saint Petersburg, 199178, Russian Federation, SC 15925268000, https://orcid.org/0000-0001-6859-7120, ivkote@comsec.spb.ru

Статья поступила в редакцию 19.04.2025
Одобрена после рецензирования 28.05.2025
Принята к печати 17.07.2025

Received 19.04.2025
Approved after reviewing 28.05.2025
Accepted 17.07.2025

Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ
июль–август 2025 Том 25 № 4 http://ntv.ifmo.ru/
SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL OF INFORMATION TECHNOLOGIES, MECHANICS AND OPTICS
Jule–August 2025 Vol. 25 No 4 http://ntv.ifmo.ru/en/
ISSN 2226-1494 (print) ISSN 2500-0373 (online)

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ

doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-4-676-683
УДК 004.89

Генерация шрифтов на основе анализа стиля и структуры символов с использованием диффузионных моделей

Максим Игоревич Маслов[1], Анна Евгеньевна Авдюшина[2], Мария Александровна Солодкая[3], Александр Владимирович Кугаевских[4]✉

[1] ООО «Нанософт Разработка», 108811, Москва, Российская Федерация
[1,2,3,4] Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация
[2] АО «Центр исследований и разработок», Москва, 101000, Российская Федерация

[1] maxmiriko@gmail.com, https://orcid.org/0009-0005-8198-4703
[2] avdiushina@itmo.ru, https://orcid.org/0000-0002-8235-902X
[3] msolodkaya@itmo.ru, https://orcid.org/0009-0000-7047-6862
[4] avkugaevskikh@itmo.ru✉, https://orcid.org/0000-0002-6676-0518

Аннотация

Введение. Рассмотрена роль генеративных нейросетей в разработке и оптимизации шрифтов, которые играют ключевую роль в создании эстетически привлекательных и функциональных дизайнов. Основное внимание уделено лицензионным ограничениям и недостаточной доступности шрифтов для различных мировых языков, что создает сложности для дизайнеров и типографов в процессе создания текстовых материалов. Новизна подхода заключается в применении диффузионной модели в качестве генеративной нейронной сети для автоматического создания шрифтов, включая недостающие глифы для языков, не поддерживаемых стандартными шрифтами. **Метод.** Разработана диффузионная модель, представляющая собой алгоритм генерации шрифтов на основе анализа закономерностей структуры символов и логики их построения. Модель интегрирована в программное решение, которое автоматизирует процесс создания шрифтовых макетов, позволяя пользователям генерировать новые глифы и шрифты с учетом специфических языковых потребностей. Методика включает предварительную подготовку данных, обучение сети и последующую генерацию символов, имитирующих стиль и композицию исходных шрифтов. **Основные результаты.** В ходе экспериментов диффузионная модель продемонстрировала высокую способность к генерации качественных шрифтовых символов, визуально схожих с оригинальными образцами. В качестве исходных данных использовались шрифтовые наборы с ограниченным набором символов, что позволило оценить возможности модели по созданию недостающих глифов для различных языков. Результаты показали, что разработанная модель успешно воспроизводит стилистические особенности оригинального шрифта, что подтверждает ее потенциал для создания универсальных шрифтовых решений, адаптированных к глобальным потребностям. **Обсуждение.** Предложенная методика генерации шрифтов представляет интерес для специалистов в области дизайна, типографики и разработки текстовых материалов, предназначенных для различных языковых аудиторий. Полученные результаты могут быть полезны при создании шрифтов для использования в многоязычных проектах, особенно если возникает потребность в добавлении недостающих символов.

Ключевые слова

генерация шрифтов, диффузионные модели, синтез изображений, шрифтовой дизайн, стиль шрифтов

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания (проект FSER-2025-0004).

Ссылка для цитирования: Маслов М.И., Авдюшина А.Е., Солодкая М.А., Кугаевских А.В. Генерация шрифтов на основе анализа стиля и структуры символов с использованием диффузионных моделей // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2025. Т. 25, № 4. С. 676–683. doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-4-676-683

© Маслов М.И., Авдюшина А.Е., Солодкая М.А., Кугаевских А.В., 2025

Font generation based on style and character structure analysis using diffusion models

Maksim I. Maslov[1], Anna E. Avdyushina[2], Maria A. Solodkaya[3], Alexander V. Kugaevskikh[4]✉

[1] LLC "Nanosoft Razrabotka", 108811, Moscow, Russian Federation
[1,2,3,4] ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation
[2] JSC "Research and development center", Moscow, 101000, Russian Federation

[1] maxmiriko@gmail.com, https://orcid.org/0009-0005-8198-4703
[2] avdiushina@itmo.ru, https://orcid.org/0000-0002-8235-902X
[3] msolodkaya@itmo.ru, https://orcid.org/0009-0000-7047-6862
[4] avkugaevskikh@itmo.ru✉, https://orcid.org/0000-0002-6676-0518

Abstract

The article discusses the role of generative neural networks in the development and optimization of fonts which play a key role in creating aesthetically attractive and functional designs. The main attention is paid to licensing restrictions and insufficient availability of fonts for various world languages, which creates difficulties for designers and typographers in the process of creating text materials. The novelty of the approach lies in the use of the diffusion model as a generative neural network for automatic font creation, including missing glyphs for languages not supported by standard fonts. To solve the tasks set, a diffusion model has been developed which is an algorithm for generating fonts based on the analysis of patterns in the structure of symbols and the logic of their construction. The model is integrated into an application that automates the process of creating font layouts, allowing users to generate new glyphs and fonts tailored to specific language needs. This technique includes preliminary data preparation, network training, and subsequent character generation that mimic the style and composition of the original fonts. During the experiments, the diffusion model demonstrated a high ability to generate high-quality font characters visually similar to the original samples. Font sets with a limited set of characters were used as source data, which allowed us to evaluate the capabilities of the model to create missing glyphs for various languages. The results showed that the developed model successfully reproduces the stylistic features of the original font, which confirms its potential for application in the development of font solutions for global use. The proposed method of font generation is of interest to specialists working in the field of design, typography, and the creation of text materials for various language audiences. The results obtained can be useful when creating fonts intended for use in multilingual projects that require the presence of missing characters.

Keywords

font generation, diffusion models, image synthesis, font design, font style

Acknowledgements

The work was carried out within the framework of the State Assignment (project No. FSER-2025-0004).

For citation: Maslov M.I., Avdyushina A.E., Solodkaya M.A., Kugaevskikh A.V. Font generation based on style and character structure analysis using diffusion models. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2025, vol. 25, no. 4, pp. 676–683 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-4-676-683

Введение

В современном мире компьютерных технологий разработка и оптимизация шрифтов играют важную роль в формировании эстетически привлекательных и функциональных дизайнов [1]. Однако использование шрифтов ограничено различными факторами. В первую очередь, шрифты являются интеллектуальной собственностью компаний, и отдаются в аренду на определенный срок, а также тип соглашения контролирует форму использования шрифта. Так, например, если лицензия позволяет использовать его только на веб-сайте, то заказчик не имеет права его использовать на печати или модифицировать шрифт для применения в других форматах. Определенной проблемой безусловно также является и факт, что большинство шрифтов, кроме лицензионных условий, имеют ограничение в доступности символов разных шрифтов под различные языки. Подавляющее большинство цифровых шрифтов, распространяемых по сети Интернет, рассчитаны на английский язык, и помимо самых популярных и известных, не предоставляют возможность написания текста с использованием символов из расширенной кириллицы, латиницы и других типов буквенных или символьных письменностей. Это может затруднять процесс создания и визуального оформления текстов для публичных материалов.

Современные генеративные нейросетевые модели представляют собой универсальный инструмент прототипирования для дизайнеров и типографов. Это позволяет значительно сократить время, затрачиваемое на разработку шрифтовых макетов, а также предоставляет существенную вариативность, что добавляет многим вариантам уникальности. Генеративные сети способны выявлять закономерности в структуре символов и композиции шрифтов, а также аппроксимировать логику построения глифов для создания недостающих букв для разных мировых языков.

В настоящей работе предложена диффузионная модель, использующаяся в качестве генеративной нейронной сети для автоматической генерации шрифтов. На базе данной модели разработано программное решение, которое реализует автоматизацию процесса создания недостающих глифов и улучшение стилистической консистентности шрифтовых наборов. Анализ основных принципов и характеристик модели демонстрирует ее потенциал для решения задач генерации шрифтов, а также перспективы применения в создании качественных шрифтовых решений для многоязычных текстов.

Цель работы — автоматизация процесса создания шрифтов.

Обзор тематических научных работ

Современные исследования показывают значительный прогресс в применении генеративных нейронных сетей для создания шрифтов. Одним из наиболее устоявшихся подходов является использование архитектуры U-Net [1]. В исследованиях [2, 3] предложен подход DeepVecFont, в котором применяется двойная модальность для учета текстуры и стиля, что обеспечивает улучшение стилистической согласованности векторных шрифтов. Данный метод получил высокие результаты в задачах генерации высокоточных шрифтов, сохраняя стилистическое соответствие оригиналу.

Особый интерес представляет работа [4], в которой разработана модель FontDiffuser, использующая диффузионные процессы для создания глифов с высокой детализацией. Для художественной генерации шрифтов в исследовании [5] предложен метод GenText, основанный на разделении управления текстурой и стилем шрифтов.

В [6] представлен Generative Adversarial Networks (GAN)-ориентированный подход StrokeGAN, направленный на генерацию китайских иероглифов. Использование штрихового кодирования позволило избежать повторения однородных образцов и повысить разнообразие создаваемых символов.

Также в работах [7, 8] исследована методика Few-Shot генерации шрифтов, включая VQ-Font. Эти модели демонстрируют способность создавать шрифты на основе ограниченного количества примеров, что особенно актуально для редких языков и новых стилей.

В дополнение к этим подходам в [9] описан метод интеграции диффузионных процессов с кодированием краев, что позволило добиться улучшения визуальной привлекательности шрифтов. Аналогично, работа [10] показывает, что многомасштабная агрегация контента в диффузионных моделях способствует повышению точности и детализации создаваемых символов.

Таким образом, учитывая крайнюю необходимость в высокой детализации сгенерированных изображений, их визуальную привлекательность и стилевую согласованность для всех символов шрифта, модели на основе автоэнкодеров менее применимы в рассматриваемых задачах. Исходя из этого, разработка универсального решения на основе диффузионной модели, способного генерировать недостающие символы с сохранением стилистической согласованности, является актуальной задачей.

Архитектура решения

Разработанная архитектура нейронной сети представляет собой универсальное решение для генерации шрифтов с учетом специфики недостающих символов. Основной акцент сделан на интеграции современных подходов, таких как диффузионные процессы, сверточные нейронные сети и механизмы внимания, что обеспечивает высокую детализацию и стилистическую согласованность глифов. Общая архитектура модели представлена на рис. 1.

Основной генеративный блок. В основе модели лежит модифицированная диффузионная архитектура U-Net, которая адаптирована для задач генерации шрифтов. Для повышения эффективности работы модели были добавлены следующие ключевые компоненты:

— слои внимания (Self-Attention) обеспечивают выявление закономерностей между различными позициями входных данных, что позволяет улучшить стилистическую согласованность символов. Подход основан на работе [11], где рассмотрено моделирование сложных зависимостей;

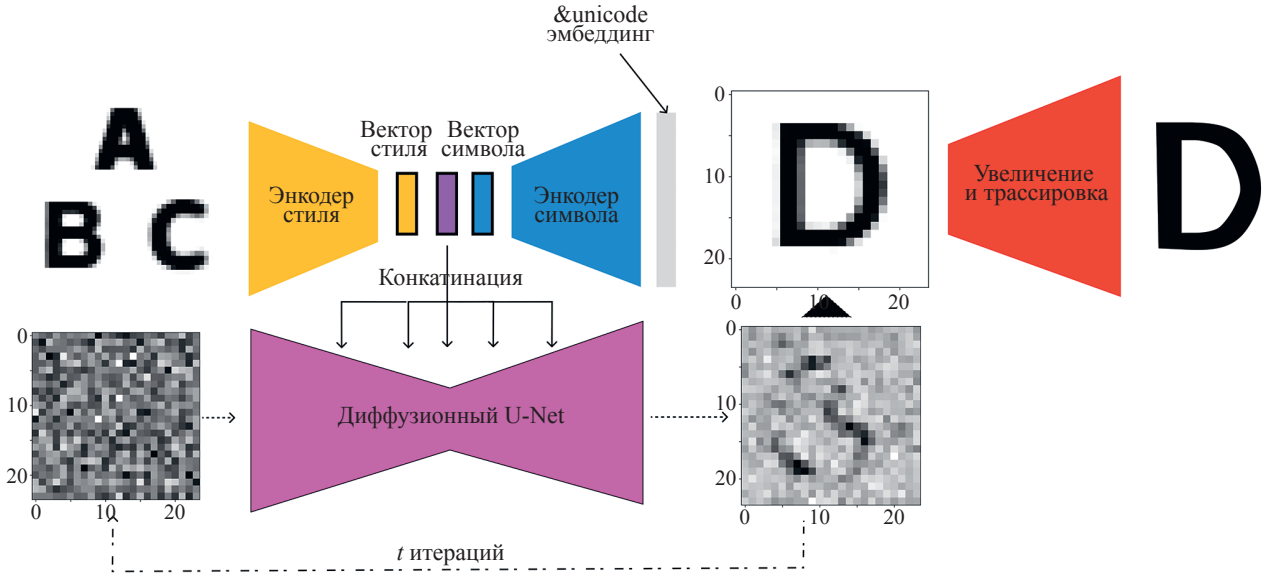


Рис. 1. Общая архитектура сети.

A, B, C и D — примеры символов шрифта для показа стилевого кодирования (примеры входных и выходных данных)

Fig. 1. Neural network architecture.

A, B, C and D are examples of font characters to show the style coding (examples of input and output data)

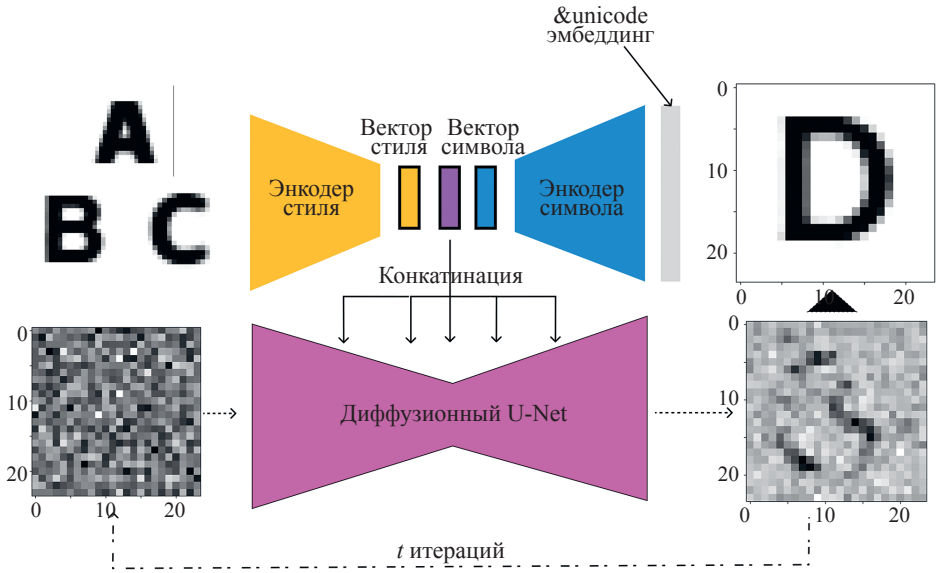


Рис. 2. Архитектура генеративного блока

Fig. 2. Architecture of the generative block

— синусоидальные позиционные эмбеддинги кодируют временные параметры и повышают устойчивость модели к шумам [12];
— групповая нормализация стабилизирует процесс обучения, что особенно важно для задач генерации на основе диффузионных процессов [13].

Модель принимает на вход трехканальное изображение размером 32 × 32 пикселей и генерирует глифы, соответствующие заданным стилевым и классовым условиям. Уникальной особенностью является возможность использования стилевых векторов для сохранения оригинального дизайна шрифта. Входные данные подаются через два энкодера: стилевой и классовый (рис. 2).

Архитектура энкодера для стиля. Стилевой энкодер разработан на базе U-Net, представленного в работе [1], и позволяет выделять ключевые визуальные признаки, необходимые для стилистического соответствия генерируемых глифов. Основные компоненты: сверточные слои извлекают важные визуальные характеристики из входных данных [14]; MaxPooling уменьшает размерность изображения для упрощения обработки и ускорения обучения.

Выходной стилевой вектор размером 4 × 4 × × 256 пикселей используется для условной генерации. Такая структура позволяет модели учитывать особенности оригинального шрифта и адаптировать их для недостающих символов. Полная архитектура энкодера стиля изображена на рис. 3.

Архитектура энкодера для класса. Классовый энкодер (рис. 4) отвечает за кодирование информации о типе символа, что критически важно для генерации точных и стилистически согласованных глифов. Он состоит из последовательности сверточных слоев, которые выделяют ключевые признаки, необходимые для определения класса символа. Данный подход основан на работах [2, 3], где использовалась двойная модальность для учета текстуры и стиля.

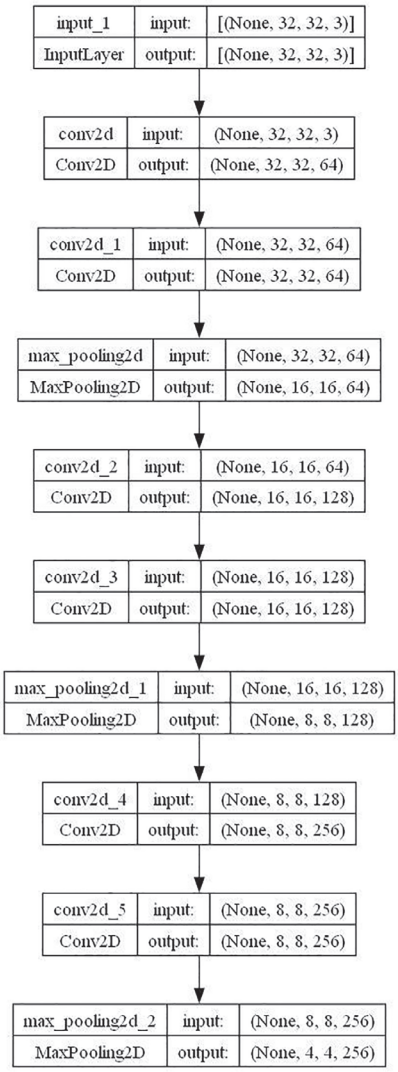


Рис. 3. Архитектура стилевого энкодера

Fig. 3. Style Encoder Architecture

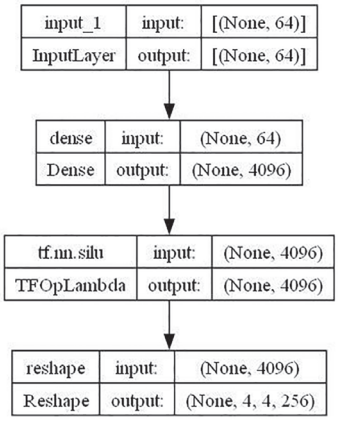


Рис. 4. Архитектура классового энкодера
Fig. 4. Class Encoder Architecture

Блок увеличения разрешения. Для улучшения визуального качества генерируемых глифов применяется модель увеличения разрешения, основанная на Efficient Sub-Pixel Convolutional Neural Network, как описано в [15]. Эта модель позволяет увеличивать изображение с 32 × 32 до 64 × 64 пикселей, обеспечивая высокую детализацию. Основные элементы блока: сверточные слои извлекают признаки на каждом этапе обработки; Depth-to-Space слой объединяет карты признаков для формирования высококачественного изображения.

Архитектура блока показана на рис. 5.

Интеграция диффузионных процессов и функции потерь. Диффузионные процессы, реализованные по представленным методикам в работах [16, 17], позволяют модели эффективно устранять шум, добавленный на этапе генерации. Для обучения модели была выбрана комбинация функций потерь L1 Loss и Perceptual Loss, что позволяет достичь более высокой визуальной согласованности [18].

Предложенная архитектура представляет собой универсальное решение для задач генерации шрифтов. Она успешно сочетает диффузионные процессы, стилевые и классовые энкодеры, а также блок увеличения разрешения для создания недостающих глифов с высокой степенью стилистической согласованности. Применение синусоидальных эмбеддингов и функций потерь с учетом восприятия позволяет улучшить качество итоговых изображений, открывая новые возможности для использования в многоязычных проектах и дизайне.

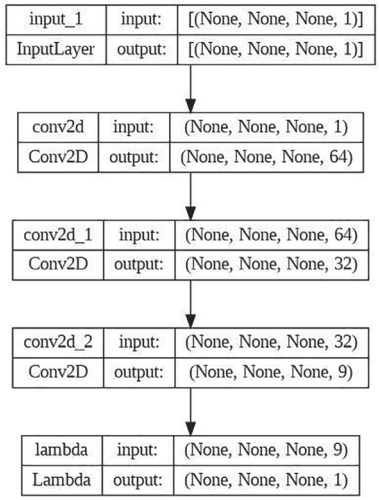


Рис. 5. Архитектура увеличивающего блока
Fig. 5. Upscale block Architecture

Экспериментальная проверка

Данные. Для обучения модели использовались растровые изображения размером 32 × 32 пикселей, представляющие 11 756 шрифтов для латинского алфавита. Обучающая выборка составила 80 % данных, валидационная — 10 %, тестовая — 10 %. Модель обучалась в течение 12 ч на NVIDIA GeForce RTX 3060 Laptop GPU с использованием PyTorch 1.13.0. Размер батча был установлен на 32, скорость обучения — $2 \cdot 10^{-4}$, количество эпох — 250. Функции потерь включали L1 Loss и Perceptual Loss, а в качестве оптимизатора использовался Adam. В модели применено 8 групп в GroupNormalization слое, два резидентных блока, размеры каналов [64, 128, 256, 512] на различных уровнях нейронной сети, основное внимание уделено на уровнях с каналами 256 и 512.

Примеры генерируемых символов. Для оценки работы модели были сгенерированы символы для различных шрифтов и стилей. На рис. 6 показан полный набор символов, созданный моделью, включая недостающие глифы. Для сравнения приведены оригинальные символы и результаты генерации.

Текстовые примеры. Для демонстрации сгенерированного шрифта моделью в реальных условиях были созданы примеры, включающие гарнитуру, отдельные слова и абзацы текста.

На рис. 7 показаны отдельные символы, демонстрирующие консистентность дизайна.

Слова. Пример текста «парашютист» приведен на рис. 8. Сочетание символов демонстрирует, как модель сохраняет стиль.

Оценка модели. Для оценки качества сгенерированных шрифтов проведена субъективная оценка группой

Рис. 6. Сравнение оригинальных (*a*) и сгенерированных (*b*) символов
Fig. 6. Comparison of the original (*a*) and generated (*b*) characters

Рис. 7. Отдельные сгенерированные символы
Fig. 7. Separate generated characters

Рис. 8. Пример слова, набранного с использованием сгенерированного шрифта

Fig. 8. An example of a word typed using a generated font

профессиональных шрифтовых дизайнеров. Основное внимание уделялось следующим критериям:

— стилистическая консистентность (насколько символы в шрифте соответствуют единому стилю);
— кернинг и трекинг (насколько гармонично символы сочетаются друг с другом в парах и словах);
— плотность текста (визуальная равномерность текста, набранного с использованием сгенерированного шрифта).

Было сгенерировано 1150 символов, среднее время генерации составило 3,6 секунд на символ. В исследовании приняли участие 15 профессиональных дизайнеров. Для оценки использовалась шкала от 1 до 10, где 1 означает «неудовлетворительно», а 10 — «отлично». Усредненные оценки дизайнеров приведены в таблице.

Проведенные эксперименты подтвердили высокую эффективность предложенной модели для задач генерации шрифтов. На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы:

1) разработанная модель показала способность сохранять единый стиль символов в рамках шрифтового набора, однако были выявлены случаи, когда отдельные символы, такие как «ш» и «ю» (рис. 9), выбивались из общего стилистического ряда, что указывает на необходимость доработки алгоритма обработки особенностей сложных символов;
2) модель демонстрирует хорошую работу с межбуквенными расстояниями. Тем не менее, выявлены недостатки в обработке определенных пар символов, например, «AV» и «To». Это указывает на необходимость улучшения механизма регулировки кернинга, особенно для пар с высокой частотой использования;
3) основные проблемы связаны с визуальным шумом из-за избыточных штрихов и недостаточной равномерностью толщины линий.

Таблица. Средние оценки по критериям

*Table. A*verage scores according to criteria

Критерии	Средняя оценка	Стандартное отклонение
Стилистическая согласованность	5,7	1,7
Кернинг/межбуквенные интервалы	7,3	1,3
Плотность текста	5,0	1,5

Рис. 9. Пример слова, с не консистентными символами «ш» и «ю»

Fig. 9. Example of a word with inconsistent “ш” and “ю” characters

Полученные результаты подтверждают, что разработанная архитектура успешно решает задачу генерации шрифтов, включая восполнение недостающих символов и адаптацию для различных стилей. Тем не менее, выявленные замечания дизайнеров указывают на необходимость повышения стилистической однородности символов, включая доработку обработки сложных букв, оптимизацию алгоритма кернинга для улучшения межбуквенных расстояний в парах букв и текстах.

Заключение

Проведенные исследования и эксперименты показали, что предложенная архитектура нейронной сети, основанная на диффузионных процессах, успешно решает задачу генерации недостающих символов в шрифтовых наборах. Разработанная модель демонстрирует высокую стилистическую консистентность символов, что подтверждается оценкой профессиональных шрифтовых дизайнеров. Результаты экспериментов показали, что использование стилевых и классовых энкодеров в сочетании с диффузионной архитектурой U-Net позволяет создавать глифы, соответствующие исходному стилю шрифта, даже для языков с недостаточной шрифтовой поддержкой.

Особое внимание уделено анализу кернинга и трекинга, где модель продемонстрировала гармоничное сочетание символов в парах букв и словах. Примеры текста, набранного с использованием сгенерированных шрифтов, показали высокую визуальную плотность и читабельность. Тем не менее, выявлены некоторые ограничения, включая трудности с генерацией символов для шрифтов с сильно выраженными декоративными элементами и нестандартными структурами.

Дальнейшая доработка модели может быть направлена на расширение набора данных за счет более разнообразных шрифтов, интеграцию техник Few-Shot Learning для улучшения генерации символов при ограниченном объеме данных, оптимизацию кернинга и трекинга через внедрение дополнительных метрик качества в процесс обучения.

Предложенная архитектура имеет значительный потенциал для практического применения, включая автоматизацию шрифтового дизайна, создание многоязычных текстовых решений и адаптацию шрифтов для специализированных проектов. Результаты исследования подчеркивают важность интеграции современных подходов, таких как диффузионные модели, для решения задач, связанных с генерацией высококачественных шрифтов.

Литература

1. Ronneberger O., Fischer P., Brox T. U-net: Convolutional networks for biomedical image segmentation // Lecture Notes in Computer Science. 2015. V. 9352. P. 234–241. https://doi.org/10.1007/978-3-319-24574-4_28
2. Wang Y., Lian Z. DeepVecFont: synthesizing high-quality vector fonts via dual-modality learning // ACM Transactions on Graphics (TOG). 2021. V. 40. N 6. P. 1–15. https://doi.org/10.1145/3478513.3480488
3. Wang Y., Wang Y., Yu L., Zhu Y., Lian Z. DeepVecFont-v2: Exploiting Transformers to Synthesize Vector Fonts with Higher Quality // Proc. of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2023. P. 18320–18328. https://doi.org/10.1109/CVPR52729.2023.01757
4. Yang Z., Peng D., Kong Y., Zhang Y., Yao C., Jin L. FontDiffuser: One-shot font generation via denoising diffusion with multi-scale content aggregation and style contrastive learning // Proc. of the AAAI Conference on Artificial Intelligence. 2024. V. 38. N 7. P. 6603–6611. https://doi.org/10.1609/aaai.v38i7.28482
5. Huang Q., Fu B., Zhang A., Qiao Y. GenText: Unsupervised artistic text generation via decoupled font and texture manipulation // arXiv. 2022. arXiv:2207.09649. https://doi.org/10.48550/arXiv.2207.09649
6. Zeng J., Chen Q., Liu Y., Wang M., Yao Y. StrokeGAN: Reducing mode collapse in Chinese font generation via stroke encoding // arXiv. 2020. arXiv:2012.08687. https://doi.org/10.48550/arXiv.2012.08687
7. Park S., Chun S., Cha J., Lee B., Shim H. Few-shot font generation with localized style representations and factorization // Proc. of the AAAI Conference on Artificial Intelligence. 2021. V. 35. N 3. P. 2393–2402. https://doi.org/10.1609/aaai.v35i3.16340
8. Yao M., Zhang Y., Lin X., Li X.; Zuo W. VQ-Font: Few-shot font generation with structure-aware enhancement and quantization // Proc. of the AAAI Conference on Artificial Intelligence. 2024. V. 38. N 15. P. 16407–16415. https://doi.org/10.1609/aaai.v38i15.29577
9. Ding M. An edge-directed diffusion equation-based image restoration approach for font generation // IEEE Access. 2023. V. 11. P. 141435–141444. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3342026
10. Jeong J., Shin J. Multi-scale diffusion denoised smoothing // Proc. of the 37th International Conference on Neural Information Processing Systems. 2023. P. 67374–67397.
11. Vaswani A., Shazeer N., Parmar N., Uszkoreit J., Jones L., Gomez A.N., Kaiser Ł., Polosukhin I. Attention is all you need // Advances in Neural Information Processing Systems. 2017. V. 30. P. 1–11.
12. Voronov G., Lightheart R., Davison J., Krettler C.A., Healey D., Butler T. Multi-scale sinusoidal embeddings enable learning on high resolution mass spectrometry data // arXiv. 2022. arXiv:2207.02980. https://doi.org/10.48550/arXiv.2207.02980
13. Dhariwal P., Nichol A. Diffusion models beat GANs on image synthesis // Advances in Neural Information Processing Systems. 2021. V. 34. P. 8780–8794.
14. Convolutional Layer – Building Block of CNNs // Towards Data Science. 2024 [Электронный ресурс]. URL: https://towardsdatascience.com/convolutional-layer-building-block-of-cnns-501b5b643e7b (дата обращения: 30.01.2024).
15. Xu M., Du X., Wang D. Super-resolution restoration of single vehicle image based on ESPCN-VISR model // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. V. 790. N 1. P. 012107. https://doi.org/10.1088/1757-899X/790/1/012107
16. Ho J., Jain A., Abbeel P. Denoising diffusion probabilistic models // Proc. of the 34th International Conference on Neural Information Processing Systems. 2020. P. 6840-6851.
17. Nichol A.Q., Dhariwal P. Improved denoising diffusion probabilistic models // Proc. of the 38th International Conference on Machine Learning. 2021. V. 139. P. 8162–8171.
18. Lin S., Yang X. Diffusion model with perceptual loss // arXiv. 2023. arXiv:2401.00110. https://doi.org/10.48550/arXiv.2401.00110

References

1. Ronneberger O., Fischer P., Brox T. U-net: Convolutional networks for biomedical image segmentation. *Lecture Notes in Computer Science*, 2015, vol. 9352, pp. 234–241. https://doi.org/10.1007/978-3-319-24574-4_28
2. Wang Y., Lian Z. DeepVecFont: synthesizing high-quality vector fonts via dual-modality learning. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 2021, vol. 40, no. 6, pp. 1–15. https://doi.org/10.1145/3478513.3480488
3. Wang Y., Wang Y., Yu L., Zhu Y., Lian Z. DeepVecFont-v2: Exploiting Transformers to Synthesize Vector Fonts with Higher Quality. *Proc. of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2023. pp. 18320–18328. https://doi.org/10.1109/CVPR52729.2023.01757
4. Yang Z., Peng D., Kong Y., Zhang Y., Yao C., Jin L. FontDiffuser: One-shot font generation via denoising diffusion with multi-scale content aggregation and style contrastive learning. *Proc. of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*, 2024. V. 38. N 7. P. 6603–6611. https://doi.org/10.1609/aaai.v38i7.28482
5. Huang Q., Fu B., Zhang A., Qiao Y. GenText: Unsupervised artistic text generation via decoupled font and texture manipulation. *arXiv*, 2022, arXiv:2207.09649. https://doi.org/10.48550/arXiv.2207.09649
6. Zeng J., Chen Q., Liu Y., Wang M., Yao Y. StrokeGAN: Reducing mode collapse in Chinese font generation via stroke encoding. *arXiv*, 2020, arXiv:2012.08687. https://doi.org/10.48550/arXiv.2012.08687
7. Park S., Chun S., Cha J., Lee B., Shim H. Few-shot font generation with localized style representations and factorization. *Proc. of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*, 2021, vol. 35, no. 3, pp. 2393–2402. https://doi.org/10.1609/aaai.v35i3.16340
8. Yao M., Zhang Y., Lin X., Li X.; Zuo W. VQ-Font: Few-shot font generation with structure-aware enhancement and quantization. *Proc. of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*, 2024, vol. 38, no. 15, pp. 16407–16415. https://doi.org/10.1609/aaai.v38i15.29577
9. Ding M. An edge-directed diffusion equation-based image restoration approach for font generation. *IEEE Access*, 2023, vol. 11, pp. 141435–141444. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3342026
10. Jeong J., Shin J. Multi-scale diffusion denoised smoothing. *Proc. of the 37th International Conference on Neural Information Processing Systems*, 2023, pp. 67374–67397.
11. Vaswani A., Shazeer N., Parmar N., Uszkoreit J., Jones L., Gomez A.N., Kaiser Ł., Polosukhin I. Attention is all you need. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 2017, vol. 30, pp. 1–11.
12. Voronov G., Lightheart R., Davison J., Krettler C.A., Healey D., Butler T. Multi-scale sinusoidal embeddings enable learning on high resolution mass spectrometry data. *arXiv*, 2022, arXiv:2207.02980. https://doi.org/10.48550/arXiv.2207.02980
13. Dhariwal P., Nichol A. Diffusion models beat GANs on image synthesis. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 2021, vol. 34, pp. 8780–8794.
14. Convolutional Layer – Building Block of CNNs. *Towards Data Science*, 2024. Available at: https://towardsdatascience.com/convolutional-layer-building-block-of-cnns-501b5b643e7b (accessed: 30.01.2024).
15. Xu M., Du X., Wang D. Super-resolution restoration of single vehicle image based on ESPCN-VISR model. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 790, no. 1, pp. 012107. https://doi.org/10.1088/1757-899X/790/1/012107
16. Ho J., Jain A., Abbeel P. Denoising diffusion probabilistic models. *Proc. of the 34th International Conference on Neural Information Processing Systems*, 2020, pp. 6840-6851.
17. Nichol A.Q., Dhariwal P. Improved denoising diffusion probabilistic models. *Proc. of the 38th International Conference on Machine Learning*, 2021, vol. 139, pp. 8162–8171.
18. Lin S., Yang X. Diffusion model with perceptual loss. *arXiv*, 2023, arXiv:2401.00110. https://doi.org/10.48550/arXiv.2401.00110

Авторы

Маслов Максим Игоревич — программист, ООО «Нанософт Разработка», 108811, Москва, Российская Федерация; студент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, https://orcid.org/0009-0005-8198-4703, maxmiriko@gmail.com

Authors

Maksim I. Maslov — Software Developer, LLC “Nanosoft Razrabotka”, 108811, Moscow, Russian Federation; Student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, https://orcid.org/0009-0005-8198-4703, maxmiriko@gmail.com

Авдюшина Анна Евгеньевна — аналитик, АО «Центр исследований и разработок», Москва, 101000, Российская Федерация; ассистент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, SC 57221719751, https://orcid.org/0000-0002-8235-902X, avdiushina@itmo.ru
Солодкая Мария Александровна — ассистент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, https://orcid.org/0009-0000-7047-6862, msolodkaya@itmo.ru
Кугаевских Александр Владимирович — кандидат технических наук, доцент, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, SC 56442745400, https://orcid.org/0000-0002-6676-0518, avkugaevskikh@itmo.ru

Anna E. Avdyushina — Analyst, JSC "Research and development center", Moscow, 101000, Russian Federation; Assistant, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, SC 57221719751, https://orcid.org/0000-0002-8235-902X, avdiushina@itmo.ru

Maria A. Solodkaya — Assistant, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, https://orcid.org/0009-0000-7047-6862, msolodkaya@itmo.ru
Alexander V. Kugaevskikh — PhD, Associate Professor, Associate Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, SC 56442745400, https://orcid.org/0000-0002-6676-0518, avkugaevskikh@itmo.ru

Статья поступила в редакцию 20.01.2025
Одобрена после рецензирования 25.05.2025
Принята к печати 21.07.2025

Received 20.01.2025
Approved after reviewing 25.05.2025
Accepted 21.07.2025

Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ
июль–август 2025 Том 25 № 4 http://ntv.ifmo.ru/
SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL OF INFORMATION TECHNOLOGIES, MECHANICS AND OPTICS
Jule–August 2025 Vol. 25 No 4 http://ntv.ifmo.ru/en/
ISSN 2226-1494 (print) ISSN 2500-0373 (online)

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ

doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-4-684-693
УДК 004.93

Выявление аномалий в условиях ограниченности и неопределенности данных с использованием zero-shot и few-shot подходов

Сергей Андреевич Милантьев[1]✉, Полина Дмитриевна Михайлова[2], Игорь Александрович Бессмертный[3]

[1,3] Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация
[2] Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, 197022, Российская Федерация

[1] geerkus@gmail.com✉, https://orcid.org/0000-0002-1970-5217
[2] polina.delitzsch@gmail.com, https://orcid.org/0009-0005-9731-0105
[3] bessmertny@itmo.ru, https://orcid.org/0000-0001-6711-6399

Аннотация

Введение. Выявление аномалий в условиях ограниченного объема данных представляет собой актуальную задачу в различных прикладных областях, включая медицинскую диагностику. Методы машинного обучения обычно требуют наличия образцов аномалий для их выявления, что не всегда возможно. Существующие методы выявления аномалий при малом количестве (few-shot) или полном отсутствии (zero-shot) обучающих данных об аномалиях имеют ряд ограничений. Существующее требование нормального распределения данных снижает точность распознавания аномалий. **Метод.** В представленной работе задача повышения точности и полноты выявления ранее не встречавшихся на изображениях аномалий решается путем комбинирования моделей Contrastive Language-Image Pretraining (CLIP) и доменно-ориентированного трансформера BERT Pre-Training of Image Transformers (BeiT). Модели CLIP и BeiT позволяют одновременно решать задачи бинарной сегментации и классификации аномалий. Более точное выявление аномалий достигается использованием взвешенных эмбеддингов от каждого модуля. Одновременно автоматизируется генерация текстовых представлений на основе Large Language Model, что существенно улучшает обобщающую способность модели. **Основные результаты.** Оценка эффективности разработанных моделей выполнена на тестовой выборке Benchmarks for Medical Anomaly Detection). Для домена кожных новообразований тестовая выборка сформирована из датасетов ISIC-18, ISIC-19, SD-198 и 7-point criteria database. Разработанный метод продемонстрировал в среднем увеличение метрики ROC AUC (при классификации, на уровне image-level) на 10,95 %, а метрики ROC AUC (при сегментации, на уровне pixel-level) — на 0,66 % по сравнению с известными решениями. **Обсуждение.** Проведенные эксперименты показали высокую эффективность предложенного подхода на задачах классификации и сегментации аномалий, метод продемонстрировал превосходящие результаты по средним значениям метрик. Анализ инференса показал, что использование вариационного автоэнкодера в составе CLIP+BeiT для генерации центроидов способствует более стабильной работе модели в few-shot подходе. Практическая значимость предложенного метода заключается в его адаптивности и устойчивости к изменяющимся распределениям данных, что делает его перспективным решением для автоматизированного анализа аномалий в медицинской диагностике, промышленном контроле и других областях, где может наблюдаться высокая неопределенность данных.

Ключевые слова

детекция аномалий, zero-shot, few-shot, трансформер, мультизадачное обучение

Благодарности

Работа поддержана Минобрнауки Российской Федерации, тема № FFZM-2025-0005.

Ссылка для цитирования: Милантьев С.А., Михайлова П.Д., Бессмертный И.А. Выявление аномалий в условиях ограниченности и неопределенности данных с использованием zero-shot и few-shot подходов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2025. Т. 25, № 4. С. 684–693. doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-4-684-693

© Милантьев С.А., Михайлова П.Д., Бессмертный И.А., 2025

Anomaly detection under data scarcity and uncertainty using zero-shot and few-shot approaches

Sergey A. Milantev[1]✉, Polina D. Mikhailova[2], Igor A. Bessmertny[3]

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

[2] Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", Saint Petersburg, 197022, Russian Federation

[1] geerkus@gmail.com✉, https://orcid.org/0000-0002-1970-5217

[2] polina.delitzsch@gmail.com, https://orcid.org/0009-0005-9731-0105

[3] bessmertny@itmo.ru, https://orcid.org/0000-0001-6711-6399

Abstract

Anomaly detection under conditions of limited data volume represents a pressing challenge across numerous applied domains, including medical diagnostics. Machine learning methods typically rely on the availability of annotated anomalous samples for training, which is often impractical. Existing anomaly detection techniques designed for few-shot or zero-shot scenarios suffer from various limitations. In particular, the common assumption of normally distributed data reduces the accuracy of anomaly classification. In this study, the task of improving the accuracy and completeness of anomaly detection in previously unseen images by leveraging a combination of the Contrastive Language-Image Pretraining (CLIP) and the domain-specific transformer BERT Pre-Training of Image Transformers (BeiT) models. The integration of CLIP and BeiT models enables simultaneous binary segmentation and anomaly classification. Enhanced anomaly detection is achieved through the use of weighted embeddings from each module. Additionally, the automated generation of textual representations based on a Large Language Model significantly enhances the generalization capacity of the system. The performance of the proposed models was evaluated on the Benchmarks for Medical Anomaly Detection test set. For the dermatological domain, a test set was constructed from ISIC-18, ISIC-19, SD-198, and 7-point criteria database. The proposed method demonstrated an average improvement in the ROC-AUC metric by 10.95 % at the image-level and by 0.66 % at the pixel-level compared to existing state-of-the-art solutions. Experimental results confirm the high effectiveness of the proposed approach in anomaly classification and segmentation tasks, showing superior average metric values. Inference analysis revealed that the incorporation of a variational autoencoder within the CLIP+BeiT architecture for centroid generation enhances the model stability in few-shot scenarios. The practical significance of the proposed method lies in its adaptability and robustness to changing data distributions, making it a promising solution for automated anomaly analysis in medical diagnostics, industrial monitoring, and other domains characterized by high data uncertainty.

Keywords

anomaly detection, zero-shot, few-shot, transformer, multi-task learning

Acknowledgements

The work was supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation, topic No. FZZM-2025-0005.

For citation: Milantev S.A., Mikhailova P.D., Bessmertny I.A. Anomaly detection under data scarcity and uncertainty using zero-shot and few-shot approaches. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2025, vol. 25, no. 4, pp. 684–693 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-4-684-693

Введение

Разработка универсального метода для выявления аномалий и нетипичных закономерностей представляет собой ключевое направление развития в различных предметных областях. Под универсальностью метода понимается способность архитектурного решения, лежащего в его основе, обеспечивать обобщение на ранее не наблюдавшиеся поддоменные области, что отражает общий уровень его генерализационной эффективности. В медицине подобные методы позволяют анализировать мультимодальные данные в контексте различных поддоменов, включая те, с которыми модель ранее не сталкивалась (zero-shot подход). Данный подход способствует расширению области применения одной модели, ускоряет процессы принятия решений и минимизирует влияние человеческого фактора.

В настоящей работе выполнен анализ современных научных разработок в области мультидоменного обнаружения аномалий, протестированных на датасетах BMAD: Benchmarks for Medical Anomaly Detection [1]. Рассмотрены следующие state-of-the-art подходы, продемонстрировавшие высокие показатели метрик на бенчмарке BMAD:

— UTRAD [2] анализирует эмбеддинги автоэнкодером на основе трансформерной архитектуры, предполагая, что реконструкция содержит более информативные признаки, чем исходное изображение;
— MKD [3] и RD4AD [4] используют дистилляцию знаний для оценки различий между моделями «ученик-учитель», предобученными на ImageNet. При этом RD4AD модифицирует классическую схему, применяя архитектуру «энкодер-учитель — декодер-ученик»;
— PatchCore [5], CFA [6] и CFLOW [7] формируют few-shot эмбеддинги для нормальных изображений и анализируют их косинусное расстояние, предполагая нормальность распределения этих данных. CFLOW использует двухпотоковый анализ аномалий на глобальном и локальном уровнях;
— VAND-APRIL-GAN [8] является усовершенствованной версией WinCLIP, комбинируя zero-shot и few-shot подходы. В данной модели CLIP разбивается на четыре этапа, после чего эмбеддинги сравниваются по косинусному сходству, формируя две независимые оценки: zero-shot score и few-shot score.

Несмотря на высокие значения метрик на сложных датасетах, большинство рассмотренных методов

(за исключением VAND-APRIL-GAN) предполагают нормальное распределение данных, что ограничивает их универсальность и снижает эффективность при анализе аномалий с семантической точки зрения. В то же время VAND-APRIL-GAN полностью полагается на Contrastive Language-Image Pretraining (CLIP), который изначально обучался на общих задачах, что может снижать его адаптивность к специализированным доменам.

Современные методы либо предполагают априорную нормальность распределения, либо плохо масштабируются на поддомены с выраженной семантической неоднородностью. Настоящее исследование направлено на устранение этого противоречия путем объединения zero-shot и few-shot методов с механизмом доменной адаптации и мультизадачного обучения. Таким образом, формулируется новая задача: разработка универсальной архитектуры, устойчивой к междоменным сдвигам при отсутствии аномальных примеров в обучении.

В работе предложена модель, сочетающая zero-shot и few-shot подходы в условиях ограниченности и неопределенности данных. Для повышения ее адаптивности CLIP корректируется с использованием доменно-ориентированной трансформерной модели. В рамках исследования распределения оценивались через эмпирическое распределение признаков в скрытых слоях моделей CLIP и BERT Pre-Training of Image Transformers (BeiT), а также с использованием расстояний между эмбеддингами в косинусном пространстве. Модель оптимизируется сразу на двух задачах: выявление областей интереса (бинарных масок) и классификация аномалий. Итоговый результат формируется на основе взвешенных эмбеддингов от каждого модуля. Дополнительно усовершенствована система текстового представления данных: вместо ручного формирования текстовых представлений применяется автоматизированный подход с использованием Large Language Model (LLM), что существенно повышает обобщающую способность модели.

Под предлагаемым методом понимается архитектурное решение, сочетающее мультимодальные модели с доменной адаптацией. Новизна заключается в интеграции CLIP и BeiT по скрытым состояниям с регулируемыми весами, что ранее не применялось в задачах мультизадачной детекции аномалий в условиях отсутствия аномальных примеров. Также впервые используется механизм сравнения выходов модели с эталонами, сформированными через Variational Autoencoder (VAE), на этапе инференса в качестве few-shot примеров.

Методы и подходы

Предобработка данных. В качестве предметной области для разработки универсальной модели выявления аномалий был выбран медицинский домен. В текущей работе под неопределенностью и ограниченностью данных понимается отсутствие образцов аномальных объектов в тренировочной выборке или априорных знаний о распределении аномалий. Таким образом, модели обучаются семантически понимать нормальные образцы, что позволяет во время валидации и тестов выявлять аномалии. В проведенных экспериментах были использованы наборы данных, представленные на рис. 1.

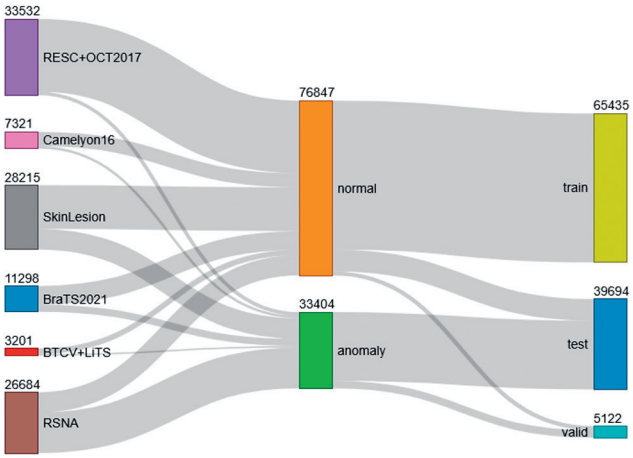


Рис. 1. Используемые наборы данных.

Цифровые обозначения — количество образцов в наборе данных, где normal — изображения нормального класса; anomaly — изображения класса аномалии; train — обучающая выборка; test — тестовая выборка; valid — валидационная выборка; OCT[1] — Optical Coherence Tomography Dataset; RESC [9] — Retinal Edema Segmentation Challenge Dataset; RSNA [10] — Radiological Society of North America Pneumonia Detection Dataset

Fig. 1. The datasets used in the study. Numerical labels indicate the number of samples.

Digits — number of samples in the data set; normal — normal class images; anomaly — anomaly class images; train — testing sample; test — test sample; valid — validation sample; OCT[1] — Optical Coherence Tomography Dataset; RESC [9] — Retinal Edema Segmentation Challenge Dataset; RSNA [10] — Radiological Society of North America Pneumonia Detection Dataset

[1] Kermany D. Zhang K., Goldbaum M. Labeled Optical Coherence Tomography (OCT) for Classification, Mendeley Data v2, doi: 10.17632/rscbjbr9sj.

Перед использованием в модели все изображения проходили предварительную проверку на дубликаты с использованием MD5-хэшей и перцептивных хэшей. Далее выполнялся этап предобработки, включающий операции CenterCrop и Resize (до 336 × 336 пикселов для $CLIP_{vis}$ и 384 × 384 пикселов для BeiT), а также нормализацию данных.

Текстовые представления для каждого объекта формировались автоматически с помощью модели LLAMA3 в соответствии с заранее заданным промптом.

Архитектурное решение. Для решения задачи обнаружения аномалий в условиях ограниченности и неопределенности данных предлагается использовать комбинацию zero-shot подхода с добавлением промежуточных состояний из трансформера, специализированного на конкретном поддомене. Применена интеграция моделей CLIP и BeiT, объединенных посредством линейных слоев по каждому четвертому скрытому состоянию. Этот подход позволяет обогащать внутренние эмбеддинги CLIP за счет адаптивного смешивания с доменно-ориентированными представлениями BeiT, что особенно важно, поскольку анализ аномалий выходит за рамки исходных задач CLIP.

На рис. 2 представлена архитектура разработанной модели.

Zero-shot подход основан на предварительно обученной мультимодальной модели CLIP (*openai/clip-vit-large-patch14-336*). В предложенной схеме CLIP разделен на две компоненты:

— $CLIP_{vis}$ — модуль для обработки входных изображений;

— $CLIP_{text}$ — модуль для обработки текстовых представлений.

Основное внимание в архитектуре уделяется обработке визуальных признаков. Каждое входное изображение проходит через модуль Processor, где выполняется нормализация и приведение к требуемому размеру. Для $CLIP_{vis}$ изображение масштабируется до 336 × 336 пикселов, после чего разбивается на фрагменты 14 × 14. В свою очередь, для BeiT (*microsoft/beit-large-patch16-384*) входное изображение трансформируется в размер 384 × 384 пикселов и разбивается на фрагменты 16 × 16.

Объединение представлений осуществляется следующим образом: к эмбеддингам encoder-слоев $CLIP_{vis}$ на уровнях {4, 8, 12, 16, 20, 24} добавляются соответствующие скрытые состояния BeiT. Для каждого слоя MLP_i применяется поэлементная сумма с весовыми коэффициентами, регулирующими вклад каждой модели:

$$MLP_{inputs_i} = \beta_i C_i + \gamma_i B_i,$$

где β_i и γ_i — весовые коэффициенты эмбеддингов $CLIP_{vis}$ и BeiT; C_i и B_i — эмбеддинги $CLIP_{vis}$ и BeiT. В выполненном эксперименте приняты значения $\beta_i = 0{,}4$ и $\gamma_i = 0{,}6$ для всех слоев. Значения параметров подбирались эмпирически для разных доменов с помощью метода Grad-CAM, использующийся для визуализации и интерпретируемости предсказания слоев, и показателей метрик в процессе обучения. Было установлено, что увеличение γ_i (вклад BeiT) позволяет повысить чувствительность модели к редким структурам внутри домена.

Поэлементная сумма эмбеддингов размерности [577, 1024] передается в residual-соединение (MLP_i), что позволяет скорректировать внимание модели CLIP на задаче выявления аномалий. Подробная архитектура Multi-Layer Perceptron (MLP) модуля представлена на рис. 3.

Объединенные эмбеддинги C_i из $encoder_i$ и B_i из $hidden_state_i$ параллельно подаются в линейные слои, выполняющие задачи классификации и сегментации. Конструктивно эти слои идентичны, но оптимизированы под различные задачи. Архитектурно они состоят из двух последовательных линейных преобразований с размерностями [$in = 1024$, $out = 768$] и [$in = 768$, $out = 1024$].

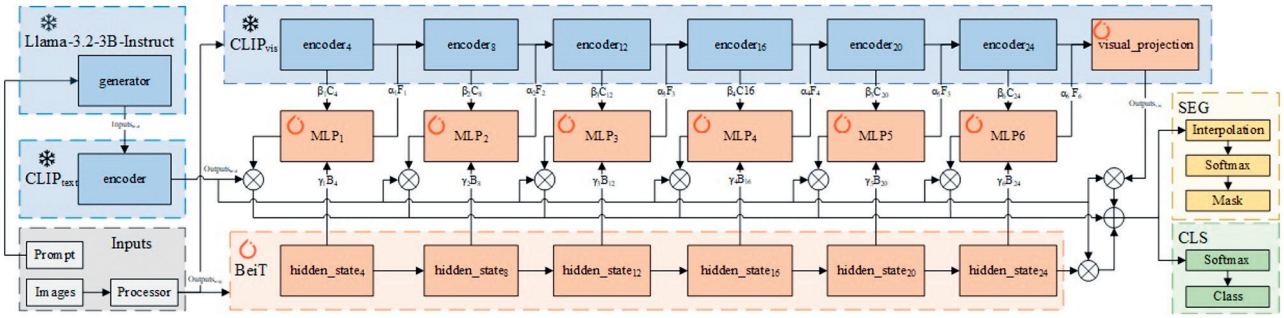


Рис. 2. Архитектура модели CLIP + BeiT.

Оранжевый цвет — все обучаемые модули; синий — замороженные параметры; серый — входящие данные; желтый — модуль сегментации; зеленый — модуль классификации; β_i и γ_i — весовые коэффициенты эмбеддингов $CLIP_{vis}$ и BeiT; C_i и B_i — эмбеддинги $CLIP_{vis}$ и BeiT; $inputs_{text}$ — сгенерированный текст; $outputs_{text}$ — текстовое представление; $outputs_{vis}$ — визуальное представление; SEG — модуль результирующего сегментатора; CLS — модуль результирующего классификатора

Fig. 2. CLIP + BeiT model architecture.

Colors: orange — all training modules; blue — freezed parameters; gray — input data; yellow — segmentation module; green — classification module; β_i and γ_i — embedding weighting factors of $CLIP_{vis}$ and BeiT; C_i и B_i — embeddings of $CLIP_{vis}$ and BeiT; $inputs_{text}$ — generated text; $outputs_{text}$ — text representation; $outputs_{vis}$ — visual representation; SEG — resulting segmenter module; CLS — resulting classificator module

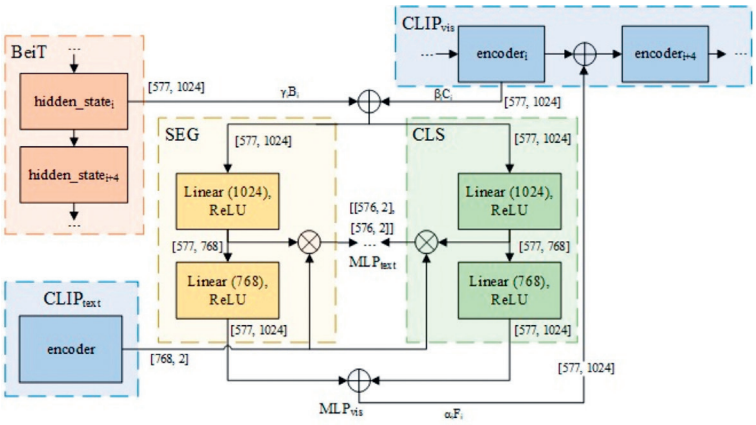


Рис. 3. Детальный вид модуля MLP.

Оранжевый цвет — модуль BeIT; синий — модуль CLIP; желтый — модуль сегментации; зеленый — модуль классификации

Fig. 3. Detailed view of the MLP module.

Colors: orange — BeIT module; blue — CLIP module; yellow — segmentation module; green — classification module

После первого линейного слоя эмбеддинги размерности [577, 768] умножаются на текстовые представления из $CLIP_{text}$ размерности [768, 2]. Полученные произведения обозначаются как MLP_{text_i} и передаются для вычисления итогового эмбеддинга по всей модели. Параллельно эмбеддинги первого линейного слоя поступают во второй линейный слой, формируя на выходе представление размерности [577, 1024].

Далее эмбеддинги, полученные с классификационного и сегментационного слоев, поэлементно суммируются. Итоговый результат, взвешенный коэффициентом α_i, вычисляется по формуле:

$$MLP_{vis_i} = \alpha_i F_i + (1 - \alpha_i) C_i,$$

где α_i управляет вкладом дополнительных эмбеддингов. В данном эксперименте установлено значение $\alpha_i = 0{,}5$ для всех слоев ($\alpha_1 = \ldots = \alpha_6 = 0{,}5$), что обеспечивает эквивалентное влияние различных модулей.

Таким образом, MLP_i формирует три выходных эмбеддинга:

— результат классификационного уровня;
— результат сегментационного уровня;
— произведение эмбеддинга с текстовым представлением.

Одновременное решение задач бинарной классификации и сегментации в рамках единого MLP-модуля реализует парадигму мультизадачного обучения, позволяя модели учитывать пространственную структуру и семантическую информацию при формировании предсказаний.

Экспериментально подтверждено, что введение классификационного и сегментационного слоев способствует улучшению обобщающей способности модели, ускоряя ее сходимость и значительно повышая метрики на задачах классификации и сегментации.

На заключительном этапе MLP_6, а также выходные эмбеддинги $CLIP_{vis}(encoder_{24})$ и $BeiT(hidden_state_{24})$ передаются в слой *visual_projection* (*in = 1024*, *out = 768*) из $CLIP_{vis}$, веса которого подлежат обучению.

Нормализованный выход данного слоя $outputs_{vis}$ ([577, 768]) умножается на текстовые эмбеддинги $CLIP_{text}$ ([768, 2]). Аналогично, нормализованный выход $outputs_{BeiT}$ из модуля BeiT также перемножается с текстовыми эмбеддингами $CLIP_{text}$.

Финальный эмбеддинг формируется как поэлементная сумма:

$$outputs_{final} = outputs_{vis} + outputs_{BeiT} + MLP_{text_i}.$$

Итоговое представление *outputs_final* размерности [577, 768] передается в сегментационный и классификационный модули для постобработки. В классификационном модуле применяется softmax(dim = –1), а итоговый класс вычисляется усреднением значений по всем патчам с последующей нормализацией в диапазон $result_{df} \in [0, 1]$. В сегментационном модуле для $result_{seg}$ выполняются аналогичные операции, но с дополнительной интерполяцией, позволяющей сформировать бинарную маску.

Для формирования текстовых входных данных используется модель *LLAMA-3.2-3B-Instruct*. В рамках заданного промпта для каждого класса LLM генерирует по 10 текстовых шаблонов, описывающих нормальные и аномальные изображения.

Обучение и оптимизация модели. Проведены эксперименты по интеграции промежуточных состояний модели BeiT в zero-shot модель CLIP. Модель BeiT обучалась на тех же тренировочных данных, что и основная модель, но решала задачу бинарной классификации в пределах конкретного домена. В целях обеспечения модульности и итеративного подхода обучение BeiT осуществлялось отдельно от основного пайплайна.

Для оптимизации BeiT использовался *AdamW* с параметром *learning_rate* = $5 \cdot 10^{-5}$. В качестве функции потерь применялась *FocalLoss*, а для обеспечения стабильной начальной сходимости использовался *warmup scheduler*, где *warmup_steps* составлял 5 % от общего числа шагов обучения.

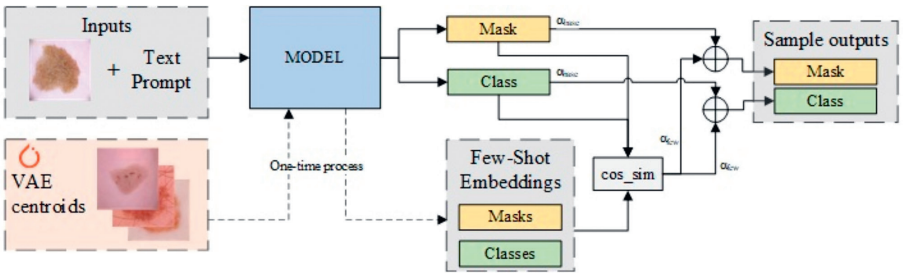


Рис. 4. Механизм инференса модели.

Розовый цвет — модуль VAE; синий — модуль модели CLIP + BeiT; серый — необучаемые модули (модуль предобработки входных данных, база данных для few-shot примеров и выходной модуль); желтый — модули сегментационной части модели; зеленый — модули классификационной части модели; α_{base} и α_{few} — весовые коэффициенты эмбеддингов модели CLIP + BeiT и few-shot эмбеддингов

Fig. 4. Model inference mechanism.

Colors: pink — VAE module; blue — module of CLIP + BeiT model; gray — untrainable modules (input data preprocessing module, database for few-shot examples and output module); yellow — modules of the segmentation part of the model; green — modules of the classification part of the model; α_{base} and α_{few} — model embedding weighting coefficients of CLIP + BeiT and few-shot embeddings

Для обучения MLP-модуля использовалась комбинированная функция потерь:

$$Loss_{MLP} = Loss_{clf} + Loss_{seg} = BCEWithLogitsLoss + \\ + DiceLoss + FocalLoss,$$

где *BCEWithLogitsLoss* отвечает за классификацию, *DiceLoss* и *FocalLoss* — за сегментацию. Оптимизация MLP-модуля выполнялась совместно с последним слоем $CLIP_{vis}$, что позволяло корректировать веса модели для решения обеих задач в рамках одной итерации обучения.

Few-shot подход. Во время инференса модели применяется few-shot подход, в котором полученные маска и класс входного сэмпла сравниваются с предвычисленными few-shot центроидами. Для каждого класса (0 — normal, 1 — anomaly) было сформировано по 16 центроидов, и сравнение проводилось с использованием коэффициента Отиаи.

Для генерации центроидов по каждому классу обучен VAE с использованием оптимизатора *Adam*(*learning_rate* = 10^{-4}) и функции потерь:

$$Loss_{VAE} = KLD_{loss} + Recon_{loss}.$$

Дополнительно применен механизм *clipping* для предотвращения взрыва градиентов. В результате обучения VAE были получены по 16 центроидов для каждого домена.

На рис. 4 представлена схема инференса модели. VAE-центроиды предобрабатываются и загружаются в память (или хранятся в сериализованном формате) единожды перед запуском инференса модели.

Во время инференса косинусное сходство между входным сэмплом и few-shot центроидами суммируется по всем патчам с последующей нормализацией. Итоговое значение представляет собой матрицу коэффициентов сходства, которая используется при агрегировании с маской и классом текущего сэмпла. Взвешивание результата осуществляется с коэффициентом $\alpha_{few} = 0{,}15$.

Результаты

Рассмотрим основные результаты, полученные в ходе экспериментов на бенчмарке BMAD [1]. Оценка эффективности разработанных моделей проводилась на тестовой выборке BMAD, а для домена кожных новообразований тестовая выборка была сформирована из датасетов ISIC-18, ISIC-19, SD-198 и 7-point criteria database [12–16].

В процессе обучения модели оценивались по метрикам F1-score, Precision, Recall, ROC AUC, Dice и IoU при различных значениях *threshold*. Для корректного сравнения с альтернативными подходами, представленными в бенчмарке BMAD, основными метриками были выбраны ROC AUC на уровне изображения (image-level) и ROC AUC на уровне пикселов (pixel-level).

В табл. 1 приведены полученные значения метрик в результате проведенного эксперимента. В столбце ISIC+ представлены результаты на тестовой подвыборке, включающей данные из SD-198, 7-point criteria database и ISIC-19.

Разработанный метод демонстрирует наилучшие результаты среди представленных моделей (в ISIC+ модель уступила предыдущей нашей модели по метрике F1-score). Метод *vanilla* CLIP + LLM демонстрирует значительно более низкие метрики по сравнению с методами, использующие модули MLP + BeiT. Особенно заметное снижение качества наблюдается на датасете ISIC+, что указывает на слабую способность модели CLIP к генерализации в условиях более сильного доменного сдвига.

В табл. 2 приведены полученные значения метрик в рамках проведенного эксперимента.

Разработанный метод показывает одни из лучших значений метрик и во всех доменах входит в топ-3 лучших показателей, при этом в среднем обеспечил прирост метрики ROC AUC (image-level) на 10,95 % и ROC AUC (pixel-level) на 0,66 % по сравнению с ранее предложенными методами. Таким образом, предложенный метод демонстрирует наивысшую эффективность как в задаче классификации, так и в задаче сегмента-

Таблица 1. Показатели метрик на классификационной задаче
Table 1. Metrics scores on classification task

Методы	Модели							
	OCT2017		RSNA [10]		Camelyon16 [11]		ISIC + [12–16]	
	Метрики							
	F1-score	ROC AUC	F1-score	ROC AUC	F1-score	ROC AUC	F1-score	ROC AUC
UTRAD [2]	—	0,9678 ± 0,0056	—	0,7564 ± 0,0124	—	0,6996 ± 0,0464	—	—
MKD [3]	—	0,9674 ± 0,0026	—	0,8201 ± 0,0012	—	0,7754 ± 0,0027	—	—
RD4AD [4]	—	0,9730 ± 0,0079	—	0,6763 ± 0,0111	—	0,6681 ± 0,0071	—	—
PatchCore [5]	—	0,9857 ± 0,0003	—	0,7614 ± 0,0067	—	0,6934 ± 0,0021	—	—
CFA [6]	—	0,7947 ± 0,0056	—	0,6683 ± 0,0023	—	0,6564 ± 0,001	—	—
CFLOW [7]	—	0,8535 ± 0,0211	—	0,7153 ± 0,0149	—	0,5566 ± 0,0197	—	—
VAND-APRIL-GAN [8]	—	0,9941	—	0,7743	—	0,7611	—	—
Ours (SkinNetV2)	—	—	—	—	—	—	0,7903	0,8633
Zero-shot method (vanilla CLIP + LLM)	0,5609	0,9712	0,4002	0,8120	0,6115	0,7474	0,6085	0,7427
BeiT	0,9419	0,9937	0,7627	0,8284	0,6347	0,7538	0,7334	0,8291
$(BeiT + CLIP + LLM)_4$	0,8320	0,9829	0,5089	0,8007	0,6050	0,7090	0,6936	0,8151
$(BeiT + CLIP + LLM)_8$	0,9367	0,9821	0,7885	0,8148	0,5423	0,7047	0,6058	0,7859
$(BeiT + CLIP + LLM)_{12}$	0,9416	0,9806	0,7696	0,8135	0,6304	0,7328	0,7362	0,834
$(BeiT + CLIP + LLM)_{16}$	0,8431	0,9719	0,5674	0,8127	0,6330	0,7419	0,7194	0,7495
$(BeiT + CLIP + LLM)_{20}$	0,9323	0,9839	0,8126	0,7959	0,5715	0,7602	0,7594	0,8566
$(BeiT + CLIP + LLM)_{24}$	0,9485	0,9908	0,8036	0,8171	0,6278	0,7156	0,7271	0,8502
BeiT + Zero/Few-shot	0,9648	0,9948	0,8510	0,8377	0,6943	0,7789	0,7829	0,8529

Примечание. Серым цветом выделены лучшие показатели на соответствующих задачах.

Таблица 2. Показатели метрик на сегментационной задаче

Table 2. Metrics scores on segmentation task

Методы	BraTS2021 [17]		BTCV[1] + LiTs [18]		RESC [9]		ISIC + [12–16]	
	roc_auc	*roc_auc*	*roc_auc*	*roc_auc*	*roc_auc*	*roc_auc*	*roc_auc*	*roc_auc*
	image-level	pixel-level	image-level	pixel-level	image-level	pixel-level	image-level	pixel-level
UTRAD [2]	0,8292 ± 0,0232	0,9261 ± 0,0067	0,5581 ± 0,0566	0,8788 ± 0,0132	0,8939 ± 0,0192	0,9454 ± 0,0124	—	—
MKD [3]	0,8147 ± 0,0036	0,8944 ± 0,0024	0,6072 ± 0,0119	0,9606 ± 0,0027	0,8900 ± 0,0025	0,8674 ± 0,0065	—	—
RD4AD [4]	0,8945 ± 0,0091	0,9645 ± 0,0017	0,6038 ± 0,0117	0,9601 ± 0,019	0,8777 ± 0,0087	0,9618 ± 0,0015	—	—
PatchCore [5]	0,9165 ± 0,0036	0,9697 ± 0,0004	0,6028 ± 0,0076	0,9643 ± 0,0019	0,9155 ± 0,001	0,9648 ± 0,001	—	—
CFA [6]	0,8438 ± 0,0087	0,9633 ± 0,0014	0,6200 ± 0,0108	0,9724 ± 0,0014	0,6990 ± 0,0026	0,9110 ± 0,0087	—	—
CFLOW [7]	0,7482 ± 0,0532	0,9376 ± 0,0067	0,5080 ± 0,0447	0,9241 ± 0,0116	0,7495 ± 0,0581	0,9378 ± 0,0057	—	—
VAND-APRIL-GAN [8]	0,8918	0,9467	0,5305	0,9624	0,9470	0,9798		
Ours (SkinNetV2)	—	—	—	—	—	—	0,8633	0,84311
Zero-shot method (vanilla CLIP + LLM)	0,6375	0,9024	0,5385	0,9498	0,7595	0,9387	0,7427	0,8137
BeiT	0,9071	0,8939	0,8283	0,9710	0,8836	0,9703	0,8291	0,9280
$(\text{BeiT} + \text{CLIP} + \text{LLM})_4$	0,9143	0,9692	0,6846	0,9215	0,9163	0,9660	0,8151	0,9096
$(\text{BeiT} + \text{CLIP} + \text{LLM})_8$	0,7238	0,9392	0,5385	0,9498	0,8877	0,9640	0,7859	0,8837
$(\text{BeiT} + \text{CLIP} + \text{LLM})_{12}$	0,8995	0,9690	0,8710	0,9535	0,9133	0,9703	0,8340	0,9243
$(\text{BeiT} + \text{CLIP} + \text{LLM})_{16}$	0,7054	0,9316	0,5532	0,9440	0,8826	0,9617	0,7495	0,8743
$(\text{BeiT} + \text{CLIP} + \text{LLM})_{20}$	0,9334	0,9755	0,7334	0,9676	0,9089	0,9746	0,8566	0,9457
$(\text{BeiT} + \text{CLIP} + \text{LLM})_{24}$	0,8982	0,9720	0,7227	0,9701	0,9045	0,9756	0,8502	0,9372
BeiT + Zero/Few-shot	0,9477	0,9817	0,9083	0,9723	0,9195	0,9745	0,8529	0,9481

Примечание. Серым цветом выделены лучшие показатели на соответствующих задачах.

[1] Landman B., et al. MICCAI Multi-Atlas Labeling Beyond the Cranial Vault - Workshop and Challenge. 2015.

ции медицинских изображений, превосходя методы из бенчмарка BMAD.

Заключение

В работе представлен универсальный метод выявления аномалий, основанный на zero-shot/few-shot подходах, что позволяет эффективно работать в условиях ограниченности и неопределенности данных в различных доменах.

Предложенный метод интегрирует модель CLIP, которая адаптируется с помощью скрытых состояний доменно-ориентированного трансформера BeiT. При этом модель одновременно решает две задачи: сегментацию (RoI → выделение бинарной маски) и бинарную классификацию аномалий, используя взвешенные эмбеддинги от каждого модуля для формирования окончательного результата.

Дополнительно оптимизирован процесс генерации текстовых представлений, что позволяет автоматизировать их создание на основе LLM. Это значительно повышает обобщающую способность модели, превосходя подход с ручной формулировкой текстовых описаний, особенно на специфичных доменах кожных новообразований.

Разработанный метод продемонстрировал высокие результаты на различных наборах данных, включая те, где наблюдаются значительные различия в распределении классов. Он показал лучшие средние значения метрик по сравнению с существующими методами из BMAD и традиционным zero-shot подходом.

Таким образом, дальнейшее развитие zero-shot и few-shot методологий представляется перспективным направлением для автоматизированного анализа аномалий, обеспечивая высокую точность, адаптивность и устойчивость даже в условиях ограниченного количества данных и высокой вариативности распределений.

Литература

1. Bao J., Sun H., Deng H., He Y., Zhang Z., Li X. BMAD: Benchmarks for Medical Anomaly Detection // arXiv. 2023. arXiv:2306.11876. https://doi.org/10.48550/arXiv.2306.11876
2. Chen L., You Z., Zhang N., Xi J., Le X. UTRAD: Anomaly detection and localization with U-Transformer // Neural Networks. 2022. V. 147. P. 53–62. https://doi.org/10.1016/j.neunet.2021.12.008
3. Salehi M., Sadjadi N., Baselizadeh S., Rohban M.H., Rabiee H.R. Multiresolution knowledge distillation for anomaly detection // Proc. of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2021. P. 14897–14907. https://doi.org/10.1109/CVPR46437.2021.01466
4. Deng H., Li X. Anomaly detection via reverse distillation from one-class embedding // Proc. of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2022. P. 9727–9736. https://doi.org/10.1109/CVPR52688.2022.00951
5. Roth K., Pemula L., Zepeda J., Schölkopf B., Brox T., Gehler P. Towards total recall in industrial anomaly detection // Proc. of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2022. P. 14298–14308. https://doi.org/10.1109/CVPR52688.2022.01392
6. Lee S., Lee S., Song B. CFA: coupled-hypersphere-based feature adaptation for target-oriented anomaly localization // IEEE Access. 2022. V. 10. P. 78446–78454. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3193699
7. Gudovskiy D., Ishizaka S., Kozuka K. CFLOW-AD: real-time unsupervised anomaly detection with localization via conditional normalizing flows // Proc. of the IEEE/CVF Winter Conference on Applications of Computer Vision (WACV). 2022. P. 1819–1828. https://doi.org/10.1109/WACV51458.2022.00188
8. Chen X., Han Y., Zhang J. APRIL-GAN: a Zero-/Few-shot anomaly classification and segmentation method // arXiv. 2023. arXiv:2305.17382v3. https://doi.org/10.48550/arXiv.2305.17382
9. Hu J., Chen Y., Yi Z. Automated segmentation of macular edema in OCT using deep neural networks // Medical Image Analysis. 2019. V. 55. P. 216–227. https://doi.org/10.1016/j.media.2019.05.002
10. Wang X., Peng Y., Lu L., Lu Z., Bagheri M., Summers R. ChestX-Ray8: hospital-scale chest X-ray database and benchmarks on weakly-supervised classification and localization of common thorax diseases // Proc. of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2017. P. 3462–3471. https://doi.org/10.1109/CVPR.2017.369
11. Bejnordi B., Veta M., van Diest P.J., van Ginneken B., Karssemeijer N., Litjens G., van der Laak J.A.W.M. Diagnostic assessment of deep learning algorithms for detection of lymph node metastases in women with breast cancer // JAMA Journal of the American Medical Association. 2017. V. 318. N 22. P. 2199–2210. https://doi.org/10.1001/jama.2017.14585

References

1. Bao J., Sun H., Deng H., He Y., Zhang Z., Li X. BMAD: Benchmarks for Medical Anomaly Detection. *arXiv*, 2023, arXiv:2306.11876. https://doi.org/10.48550/arXiv.2306.11876
2. Chen L., You Z., Zhang N., Xi J., Le X. UTRAD: Anomaly detection and localization with U-Transformer. *Neural Networks*, 2022, vol. 147, pp. 53–62. https://doi.org/10.1016/j.neunet.2021.12.008
3. Salehi M., Sadjadi N., Baselizadeh S., Rohban M.H., Rabiee H.R. Multiresolution knowledge distillation for anomaly detection. *Proc. of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2021, pp. 14897–14907. https://doi.org/10.1109/CVPR46437.2021.01466
4. Deng H., Li X. Anomaly detection via reverse distillation from one-class embedding. *Proc. of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2022, pp. 9727–9736. https://doi.org/10.1109/CVPR52688.2022.00951
5. Roth K., Pemula L., Zepeda J., Schölkopf B., Brox T., Gehler P. Towards total recall in industrial anomaly detection. *Proc. of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2022, pp. 14298–14308. https://doi.org/10.1109/CVPR52688.2022.01392
6. Lee S., Lee S., Song B. CFA: coupled-hypersphere-based feature adaptation for target-oriented anomaly localization. *IEEE Access*, 2022, vol. 10, pp. 78446–78454. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3193699
7. Gudovskiy D., Ishizaka S., Kozuka K. CFLOW-AD: real-time unsupervised anomaly detection with localization via conditional normalizing flows. *Proc. of the IEEE/CVF Winter Conference on Applications of Computer Vision (WACV)*, 2022, pp. 1819–1828. https://doi.org/10.1109/WACV51458.2022.00188
8. Chen X., Han Y., Zhang J. APRIL-GAN: a Zero-/Few-shot anomaly classification and segmentation method. *arXiv*, 2023, arXiv:2305.17382v3. https://doi.org/10.48550/arXiv.2305.17382
9. Hu J., Chen Y., Yi Z. Automated segmentation of macular edema in OCT using deep neural networks. *Medical Image Analysis*, 2019, vol. 55, pp. 216–227. https://doi.org/10.1016/j.media.2019.05.002
10. Wang X., Peng Y., Lu L., Lu Z., Bagheri M., Summers R. ChestX-Ray8: hospital-scale chest X-ray database and benchmarks on weakly-supervised classification and localization of common thorax diseases. *Proc. of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2017, pp. 3462–3471. https://doi.org/10.1109/CVPR.2017.369
11. Bejnordi B., Veta M., van Diest P.J., van Ginneken B., Karssemeijer N., Litjens G., van der Laak J.A.W.M. Diagnostic assessment of deep learning algorithms for detection of lymph node metastases in women with breast cancer. *JAMA Journal of the American Medical Association*, 2017, vol. 318, no. 22, pp. 2199–2210. https://doi.org/10.1001/jama.2017.14585

12. Tschandl P., Rosendahl C., Kittler H. The HAM10000 dataset, a large collection of multi-source dermatoscopic images of common pigmented skin lesions // Scientific Data. 2018. V. 5. P. 180161. https://doi.org/10.1038/sdata.2018.161
13. Codella N.C.F., Gutman D., Celebi M.E., Helba B., Marchetti M.A., Dusza S.W., Kalloo A., Liopyris K., Mishra N., Kittler H., Halpern A. Skin lesion analysis toward melanoma detection: a challenge at the 2017 International symposium on biomedical imaging (ISBI), hosted by the international skin imaging collaboration (ISIC) // Proc. of the IEEE 15th International Symposium on Biomedical Imaging (ISBI 2018). 2018. P. 168–172. https://doi.org/10.1109/ISBI.2018.8363547
14. Combalia M., Codella N.C.F., Rotemberg V., Helba B., Vilaplana V., Reiter O., Carrera C., Barreiro A., Halpern A.C., Puig S., Malvehy J. BCN20000: Dermoscopic lesions in the wild // arXiv. 2019. arXiv:1908.02288. https://doi.org/10.48550/arXiv.1908.02288
15. Sun X., Yang J., Sun M., Wang K. A benchmark for automatic visual classification of clinical skin disease images // Lecture Notes in Computer Science. 2016. V. 9910. P. 206–222. https://doi.org/10.1007/978-3-319-46466-4_13
16. Kawahara J., Daneshvar S., Argenziano G., Hamarneh G. Seven-point checklist and skin lesion classification using multitask multimodal neural nets // IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics. 2019. V. 23. N 2. P.538–546. https://doi.org/10.1109/JBHI.2018.2824327
17. Baid U., Ghodasara S., Mohan S., Bilello M., Calabrese E., Colak E., et al. The RSNA-ASNR-MICCAI BraTS 2021 benchmark on brain tumor segmentation and radiogenomic classification // arXiv. 2021. arXiv:2107.02314. https://doi.org/10.48550/arXiv.2107.02314
18. Bilic P, Christ P., Li H.B., Vorontsov E., Ben-Cohen A., Kaissis G., et al. The Liver Tumor Segmentation benchmark (LiTS) // arXiv. 2019. arXiv:190.04056. https://doi.org/10.48550/arXiv.1901.04056

12. Tschandl P., Rosendahl C., Kittler H. The HAM10000 dataset, a large collection of multi-source dermatoscopic images of common pigmented skin lesions. *Scientific Data*, 2018, vol. 5, pp. 180161. https://doi.org/10.1038/sdata.2018.161
13. Codella N.C.F., Gutman D., Celebi M.E., Helba B., Marchetti M.A., Dusza S.W., Kalloo A., Liopyris K., Mishra N., Kittler H., Halpern A. Skin lesion analysis toward melanoma detection: a challenge at the 2017 International symposium on biomedical imaging (ISBI), hosted by the international skin imaging collaboration (ISIC). *Proc. of the IEEE 15th International Symposium on Biomedical Imaging (ISBI 2018)*, 2018, pp. 168–172. https://doi.org/10.1109/ISBI.2018.8363547
14. Combalia M., Codella N.C.F., Rotemberg V., Helba B., Vilaplana V., Reiter O., Carrera C., Barreiro A., Halpern A.C., Puig S., Malvehy J. BCN20000: Dermoscopic lesions in the wild. *arXiv*, 2019, arXiv:1908.02288. https://doi.org/10.48550/arXiv.1908.02288
15. Sun X., Yang J., Sun M., Wang K. A benchmark for automatic visual classification of clinical skin disease images. *Lecture Notes in Computer Science*, 2016, vol. 9910, pp. 206–222. https://doi.org/10.1007/978-3-319-46466-4_13
16. Kawahara J., Daneshvar S., Argenziano G., Hamarneh G. Seven-point checklist and skin lesion classification using multitask multimodal neural nets. *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, 2019, vol. 23, no. 2, pp.538–546. https://doi.org/10.1109/JBHI.2018.2824327
17. Baid U., Ghodasara S., Mohan S., Bilello M., Calabrese E., Colak E., et al. The RSNA-ASNR-MICCAI BraTS 2021 benchmark on brain tumor segmentation and radiogenomic classification. *arXiv*, 2021, arXiv:2107.02314. https://doi.org/10.48550/arXiv.2107.02314
18. Bilic P, Christ P., Li H.B., Vorontsov E., Ben-Cohen A., Kaissis G., et al. The Liver Tumor Segmentation benchmark (LiTS). *arXiv*, 2019, arXiv:190.04056. https://doi.org/10.48550/arXiv.1901.04056

Авторы

Милантьев Сергей Андреевич — аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, sc 57225127274, https://orcid.org/0000-0002-1970-5217, geerkus@gmail.com

Михайлова Полина Дмитриевна — магистр, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, 197022, Российская Федерация, https://orcid.org/0009-0005-9731-0105, polina.delitzsch@gmail.com

Бессмертный Игорь Александрович — доктор технических наук, профессор, профессор, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, sc 36661767800, https://orcid.org/0000-0001-6711-6399, bessmertny@itmo.ru

Authors

Sergey A. Milantev — PhD Student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, sc 57225127274, https://orcid.org/0000-0002-1970-5217, geerkus@gmail.com

Polina D. Mikhailova — Magister, Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", Saint Petersburg, 197022, Russian Federation, https://orcid.org/0009-0005-9731-0105, polina.delitzsch@gmail.com

Igor A. Bessmertny — D.Sc., Full Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, sc 36661767800, https://orcid.org/0000-0001-6711-6399, bessmertny@itmo.ru

Статья поступила в редакцию 03.04.2025
Одобрена после рецензирования 28.05.2025
Принята к печати 17.07.2025

Received 03.04.2025
Approved after reviewing 28.05.2025
Accepted 17.07.2025

Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ
июль–август 2025 Том 25 № 4 http://ntv.ifmo.ru/
SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL OF INFORMATION TECHNOLOGIES, MECHANICS AND OPTICS
Jule–August 2025 Vol. 25 No 4 http://ntv.ifmo.ru/en/
ISSN 2226-1494 (print) ISSN 2500-0373 (online)

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ

doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-4-694-702
УДК 004.89

Исследование влияния состязательных атак на классификацию и кластеризацию изображений на примере модели ResNet50

Роман Ростиславович Болозовский[1], Алла Борисовна Левина[2]✉, Константин Сергеевич Красов[3]

[1,2,3] Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, 197022, Российская Федерация

[1] bolozovskii@gmail.com, https://orcid.org/0009-0004-5725-0526
[2] Alla_levina@mail.ru✉, https://orcid.org/0000-0003-4421-2411
[3] iflup@ya.ru, https://orcid.org/0009-0005-9232-5463

Аннотация

Введение. Прогресс в области компьютерного зрения привел к созданию мощных моделей, способных точно распознавать и интерпретировать визуальную информацию в различных областях знаний. На этом фоне растет уязвимость таких моделей к состязательным атакам — преднамеренному манипулированию входными данными с целью исказить модель машинного обучения и привести к неверным результатам распознавания. В работе приведены результаты исследования влияния различных типов состязательных атак на модель ResNet50 в задачах классификации и кластеризации изображений. **Метод.** Исследованы следующие типы состязательных атак: метод быстрого градиентного знака, базовый итерационный метод, метод проецируемого градиентного спуска, метод Карлини и Вагнера, состязательная атака с использованием Elastic-Net, Expectation Over Transformation Predicted Gradient Descent, атаки на основе джиттера. Для визуализации областей внимания модели применен метод Gradient-Weighted Class Activation Mapping (Grad-CAM). Для визуализации кластеров в пространстве признаков использован алгоритм t-SNE. Устойчивость к атакам оценивалась по показателям успешности атак с использованием алгоритмов *k*-ближайших соседей иерархического маленького мира с различными метриками сходства. **Основные результаты.** Выявлены существенные различия в воздействии атак на внутренние представления модели и области фокусировки внимания. Показано, что итеративные методы атак вызывают значительные изменения в пространстве признаков и заметно влияют на визуализации Grad-CAM, тогда как простые атаки оказывают меньшее воздействие. Установлена высокая чувствительность большинства алгоритмов кластеризации к возмущениям. Наибольшую устойчивость среди исследованных подходов показала метрика внутреннего произведения. **Обсуждение.** Полученные результаты указывают на зависимость устойчивости модели от параметров атак и выбора метрик сходства, что проявляется в особенностях формирования кластерных структур. Выявленные закономерности в перераспределении пространства признаков в условиях целенаправленных атак открывают перспективы для дальнейшей оптимизации алгоритмов кластеризации, способных обеспечить более высокую степень защиты систем компьютерного зрения.

Ключевые слова

состязательные атаки, компьютерное зрение, ResNet50, кластеризация изображений, KNN, HNSW

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 075-00003-24-02 от 08.02.2024 (проект FSEE-2024-0003).

Ссылка для цитирования: Болозовский Р.Р., Левина А.Б., Красов К.С. Исследование влияния состязательных атак на классификацию и кластеризацию изображений на примере модели ResNet50 // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2025. Т. 25, № 4. С. 694–702. doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-4-694-702

© Болозовский Р.Р., Левина А.Б., Красов К.С., 2025

The impact of adversarial attacks on a computer vision models perception of images

Roman R. Bolozovskii[1], Alla B. Levina[2]✉, Konstantin S. Krasov[3]

[1,2,3] Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", Saint Petersburg, 197022, Russian Federation

[1] bolozovskii@gmail.com, https://orcid.org/0009-0004-5725-0526
[2] Alla_levina@mail.ru✉, https://orcid.org/0000-0003-4421-2411
[3] iflup@ya.ru, https://orcid.org/0009-0005-9232-5463

Abstract

Advances in computer vision have led to the development of powerful models capable of accurately recognizing and interpreting visual information in various fields of knowledge. However, these models are increasingly vulnerable to adversarial attacks – deliberate manipulations of input data designed to mislead the machine-learning model and produce incorrect recognition results. This article presents the results of an investigation into the impact of various types of adversarial attacks on the ResNet50 model in image classification and clustering tasks. Various types of adversarial attacks have been investigated: Fast Gradient Sign Method, Basic Iterative Method, Projected Gradient Descent, Carlini&Wagner, Elastic-Net Attacks to Deep Neural Networks, Expectation Over Transformation Projected Gradient Descent, and jitter-based attacks. The Gradient-Weighted Class Activation Mapping (Grad-CAM) method was used to visualize the attention areas of the model. The t-SNE algorithm was applied to visualize clusters in the feature space. Attack robustness was assessed by attack success rate using *k*-Nearest Neighbors algorithm and Hierarchical Navigable Small World algorithms with different similarity metrics. Significant differences in the effects of attacks on the internal representations of the model and areas of focus have been identified. It is shown that iterative attack methods cause significant changes in the feature space and significantly affect Grad-CAM visualizations, whereas simple attacks have less impact. The high sensitivity of most clustering algorithms to perturbations has been established. The metric of the inner product showed the greatest stability among the studied approaches. The results obtained indicate the dependence of the stability of the model on the attack parameters and the choice of similarity metrics, which is manifested in the peculiarities of the formation of cluster structures. The observed feature-space redistributions under targeted attacks suggest avenues for further optimizing clustering algorithms to enhance the resilience of computer-vision systems.

Keywords

adversarial attacks, computer vision, ResNet50, image clustering, KNN, HNSW

Acknowledgements

The work was performed within the framework of the State Assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation No. 075-00003-24-02 dated 08.02.2024 (FSEE-2024-0003 project).

For citation: Bolozovskii R.R., Levina A.B., Krasov K.S. The impact of adversarial attacks on a computer vision models perception of images. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2025, vol. 25, no. 4, pp. 694–702 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-4-694-702

Введение

За последние годы в области компьютерного зрения произошел значительный прогресс, приведший к созданию мощных моделей, способных точно распознавать и интерпретировать визуальную информацию. Эти модели нашли применение в различных областях, начиная от автономного вождения транспортными средствами и визуализации медицинских данных, заканчивая системами безопасности и наблюдения. Однако на этом фоне растет обеспокоенность по поводу уязвимости таких моделей к состязательным атакам.

Состязательные атаки — преднамеренное манипулирование входными данными с целью обмануть модели машинного обучения и заставить их выдавать неверные результаты. Эти атаки создают значительную угрозу для надежности и безопасности систем компьютерного зрения, потенциально приводя к ошибочным решениям с серьезными последствиями. Понимание влияния состязательных атак на восприятие изображений моделями компьютерного зрения является актуальной областью исследований [1].

История состязательных атак начинается с работы [2], где впервые было продемонстрировано существование незаметных изменений, способных заставить глубокие нейронные сети неверно классифицировать изображения. Исследования в работах [3, 4] существенно продвинули методы защиты, сосредоточив внимание на устойчивости моделей, решающих задачи классификации. В [5, 6] были усовершенствованы алгоритмы защиты, однако вопросы влияния состязательных атак на внутренние представления нейронных сетей остаются менее изученными. При этом кластеризация играет ключевую роль в задачах поиска и сопоставления изображений, где устойчивость к атакам критически важна. Изменение пространственного распределения признаков под воздействием атак может не только повлиять на точность классификации, но и изменить структуру кластеров, что влечет за собой искажение результатов анализа данных.

Анализ научных работ по данной тематике показывает, что большинство исследований сосредоточено на оценке того, как состязательные атаки влияют на точность классификаторов и детектирование объектов. Однако изменения метрик сходства между признаковыми представлениями изображений изучены менее подробно. В данной работе предлагается комплексный подход, объединяющий визуализацию и кластеризацию признакового пространства, что дает возможность исследовать, как состязательные атаки трансформируют

структуру представлений. Таким образом, данное исследование нацелено на выявление изменений, вносимых состязательными атаками в работу алгоритмов кластеризации с различными метриками сходства, и на анализ трансформаций, происходящих в нейронной сети при обработке изображений.

Несмотря на появление новых архитектур, ResNet50 [7] по-прежнему используется в исследованиях состязательных атак (например, [8]). Компактность ее архитектуры и наличие предобученных весов делают ResNet50 удобным базовым тестовым стендом для анализа поведения модели при атаках.

Предложенный комплексный подход включает несколько этапов анализа влияния состязательных атак на модель ResNet50. Применены методы различных состязательных атак для генерации состязательных примеров и оценки их влияния на классификацию. Внимание модели визуализировалось с помощью Gradient-Weighted Class Activation Mapping (Grad-CAM) для выявления областей изображения, которые становятся более или менее значимыми под воздействием возмущений. Несмотря на то, что влияние атак на интерпретационные механизмы ранее изучалось [9], использование Grad-CAM остается наиболее простым и наглядным способом демонстрации изменений в восприятии модели. Исходные изображения и их атакованные версии преобразовывались в признаковое пространство ResNet50, после чего применялся алгоритм t-SNE для визуализации кластеров в пониженной размерности. Кроме того, анализировались скалярные произведения векторов признаков изображений для оценки изменений в метрике сходства. И, наконец, рассчитывался коэффициент успешности атак (Attack Success Rate, ASR) при помощи алгоритмов *k*-ближайших соседей (K-Nearest Neighbors, KNN) и иерархического маленького мира (Hierarchical Navigable Small World, HNSW), что позволило количественно оценить влияние возмущений на точность кластеризации и стабильность кластеров. Такой подход позволяет проанализировать, каким образом возмущения изменяют внутренние представления модели и влияют на результаты кластеризации и распределение признаков.

Целью данного исследования является анализ влияния различных типов состязательных атак на восприятие изображений нейросетевыми моделями и оценка их устойчивости в задачах классификации и кластеризации.

Методика проведения исследования

Исследуемые атаки. Рассмотрим ряд наиболее актуальных состязательных атак.

Метод быстрого градиентного знака (Fast Gradient Sign Method, FGSM) [2] можно записать в виде:

$$\eta = \varepsilon \text{sign}(\nabla_x L(\theta, x, y)),$$

где η — состязательный пример; ε — порог искажения; $L(\theta, x, y)$ — функция потерь; θ — параметры модели; x — исходное изображение; y — распределение по всем возможным классам.

Метод проецируемого градиентного спуска (Projected Gradient Descent, PGD) [3] возможно описать уравнением:

$$x^{t+1} = \prod_{x+S}(x^t + \alpha \text{sign}(\nabla_x L(\theta, x, y))),$$

где t — номер итерации; x^t — состязательный пример на итерации t; S — область допустимых изменений; α — уровень «шума», добавляемый к исходному примеру.

Атака Карлини и Вагнера (Carlini&Wagner, CW) [4] работает путем оптимизации следующего выражения и поиска w:

$$\text{minimize} \| 0{,}5(\tanh(w) + 1 - x \|_2^2 + cf(0{,}5(\tanh(w) + 1)),$$

где c — константа, отвечающая за относительную важность каждого из слагаемых в оптимизируемой функции; w — оптимизирующая переменная; f — функция потерь.

При заданном x, целевом классе t, выходных данных модели $Z(x)$ и f, определяемым, как:

$$f(x') = \max(\max\{Z(x')_i : i \neq t\} - Z(x')_{t'} - \kappa,$$

где x' — целевой состязательный пример; κ — порог достоверности для успешной атаки.

Базовый итерационный метод (Basic Iterative Method, BIM) [10] описывается с помощью:

$$X_0^{adv} = X, X_{N+1}^{adv} = \text{Clip}_{X,\varepsilon}\{X_N^{adv} + \alpha \text{sign}(\nabla_X J(X_N^{adv}, y_{true}))\},$$

где $\text{Clip}_{X,\varepsilon}\{X'\}$ — функция, выполняющая попиксельную обрезку изображения X', так что результат будет находиться в L_∞ ε-окрестности исходного изображения X; $J(X, y)$ — функция потерь на основе перекрестной энтропии нейронной сети, получающей изображение X и класс y; y_{true} — истинный класс для изображения X.

Функция потерь $f(x)$ для атак с использованием Elastic-Net (EAD) [11] определяется как:

$$f(x, t) = \max\{\max_{j \neq t}[\text{Logit}(x)]_j - [\text{Logit}(x)]_t, - \kappa\},$$

где $\text{Logit}(x) = [[\text{Logit}(x)]_1, \ldots, [\text{Logit}(x)]_\kappa] \in \mathbb{R}^\kappa$ — logit-слой (слой, предшествующий слою softmax) представляющий x в рассматриваемой глубокой нейронной сети; κ — количество классов для классификации; $\kappa \geq 0$ — порог достоверности, гарантирующий постоянный разрыв между $\max_{j \neq t}[\text{Logit}(x)]_j$ и $[\text{Logit}(x)]_t$.

Атака Expectation Over Transformation (EOT) [12] в сочетании с PGD оценивает реальный градиент сети как среднее значение градиентов по нескольким случайным векторам $\boldsymbol{\varepsilon}$:

$$\hat{x}_{t+1} \leftarrow \prod_{x+S}\left[\hat{x}_t + \eta \underset{\boldsymbol{\varepsilon}}{\text{M}}(\nabla_x L(f(x; w, \boldsymbol{\varepsilon})\hat{y})|_{x=\hat{x}_t}\right],$$

где $\hat{x}$ — состязательный пример; $\prod_{x+S}[\ldots]$ — проекция на множество допустимых возмущений S; η — коэффициент скорости обучения; $\underset{\boldsymbol{\varepsilon}}{\text{M}}(\ldots)$ — математическое ожидание по распределению $\boldsymbol{\varepsilon}$.

Функция потерь для атак на основе джиттера [13] имеет следующий вид:

$$\mathcal{L}_{jitter} = \begin{cases} \dfrac{\|\hat{z} - \mathbf{Y} + \mathcal{N}(0, \sigma)\|_2}{\|\gamma\|_p}, & \text{если неправильно классифицированы} \\ \|\hat{z} - \mathbf{Y} + \mathcal{N}(0, \sigma)\|_2, & \text{если еще не были неправильно классифицированы} \end{cases},$$

где $\hat{z} = \text{softmax}\left(\alpha \dfrac{z}{\|z\|_\infty}\right)$; $\mathbf{Y}$ — вектор истинных меток в унитарном коде; $\mathcal{N}(0, \sigma)$ — функция нормального шума; σ — уровень шума; γ — состязательное возмущение; p — норма.

Визуализация и используемые методы. Для интерпретации решений модели классификации был применен метод Grad-CAM [14], визуализирующий области изображения, наиболее влияющие на прогноз. Для визуализации кластеров изображений был задействован алгоритм t-SNE [15], заключающийся в минимизации расхождения Кульбака–Лейблера (Kullback–Leibler, KL) между распределениями вероятностей, построенными в исходном многомерном пространстве $p_{j|i}$ и в пространстве пониженной размерности $q_{j|i}$. Исходное сходство $p_{j|i}$ оценивается на основе гауссова ядра следующим образом:

$$p_{j|i} = \exp\left(-\frac{\|x_i - x_j\|^2}{2\sigma_i^2}\right) \Big/ \sum_{k \neq i} \exp\left(-\frac{\|x_i - x_k\|^2}{2\sigma_i^2}\right),$$

где x_j, x_i — точки данных; σ_i — дисперсия гауссовой функции, центрированной в x_i.

Аналогично в пространстве пониженной размерности:

$$q_{j|i} = \exp\left(-\|y_i - y_j\|^2\right) \Big/ \sum_{k \neq i} \exp\left(-\|y_i - x_k\|^2\right),$$

где y_j, y_i — аналоги точек данных в пространстве пониженной размерности.

Целевая функция для минимизации:

$$C = \sum_i \text{KL}(P_i|Q_i) = \sum_i \sum_j p_{j|i} \log \frac{p_{j|i}}{q_{j|i}},$$

где P_i и Q_i — условные распределения вероятностей по всем другим точкам данных и карты, заданным x_i и y_i соответственно.

Далее рассматриваются алгоритмы KNN, используемые в задачах кластеризации.

Алгоритм KNN [16] используется для поиска k-ближайших соседей в пространстве признаков. При поиске вычисляются расстояния (например, евклидово, манхэттенское или Минковского) между точкой запроса и всеми точками обучающего набора.

Алгоритм KNN с помощью HNSW [17] — усовершенствованный метод поиска ближайших соседей. HNSW может использоваться с различными показателями сходства: косинусным ($d = 1{,}0 - \sum(A_i B_i) \big/ \sqrt{\sum A_i^2 \sum B_i^2}$; L_2 в квадрате ($d = \sum((A_i - B_i)^2)$); внутреннего произведения ($d = 1{,}0 - \sum((A_i B_i))$. A_i, B_i — значения i-го признака векторов признаков **A** и **B** соответственно.

Основные результаты

Оценка влияния состязательных атак на Grad-CAM в задаче классификации. Для изучения влияния состязательных атак на Grad-CAM в задаче классификации проводились эксперименты с использованием эталонного набора данных ImageNet-1k [18] при различных сценариях атак. Применялись такие методы, как: FGSM (BIM), PGD, CW (с метрикой L_2), EAD с нормой L_∞, Expectation Over Transformation Projected Gradient Descent (EOTPGD) и атаки на основе джиттера. Для каждого метода генерировались возмущения и оценивалось их влияние на результат Grad-CAM. Результаты экспериментов представлены на рис. 1 и 2.

FGSM и атака на основе джиттера влияют на Grad-CAM меньше, чем другие. FGSM генерирует состязательные примеры, делая один шаг в направлении градиента, используя фиксированный размер шага. Из-за относительно неглубокой природы атаки внимание сети в основном остается на важных областях, что приводит к минимальному влиянию на визуализацию. Атака на основе джиттера предполагает внесение небольших случайных изменений (например, незначительных сдвигов или поворотов) во входное изображение. Эти изменения вызывают некоторую вариативность изображения, но не изменяют существенных характеристик, на которые опирается модель глубокого обучения, такая как ResNet50, при классификации. Поскольку данный подход не нацелен непосредственно на границы принятия решений или градиенты модели в очень агрессивной манере, он оказывает менее разрушительное воздействие по сравнению с градиентными методами.

Более продвинутые атаки используют многочисленные итерации и методы оптимизации, оказывая более агрессивное влияние на процесс принятия решений в модели, что может привести к значительным изменениям в областях фокусировки нейронной сети.

На основе полученных визуализаций можно сделать вывод, что различные атаки оказывают разное влияние на разные слои сети. Атаки на основе FGSM и джиттера приводят к размытию фокуса модели, сохраняя наиболее значимую часть исходного изображения. В то же время изучение визуального представления шаблонов внимания начальных слоев нейронной сети показывает, что атаки на основе FGSM и джиттера вызывают меньшую степень изменения восприятия по сравнению с другими типами атак.

Оценка влияния состязательных атак на кластеризацию изображений. Для изучения влияния состязательных атак на визуализацию кластеризации изображений проводились эксперименты с целью изменения класса изображения при различных сценариях атак. Использовались такие методы, как: FGSM (BIM), PGD, CW, EAD с нормой , EOTPGD и атаки на основе джиттера. Для каждого метода генерировались возмущения и оценивалось их влияние на визуализацию.

Изображения с классом «королевский пингвин» подвергались атаке с целью изменить класс исход-

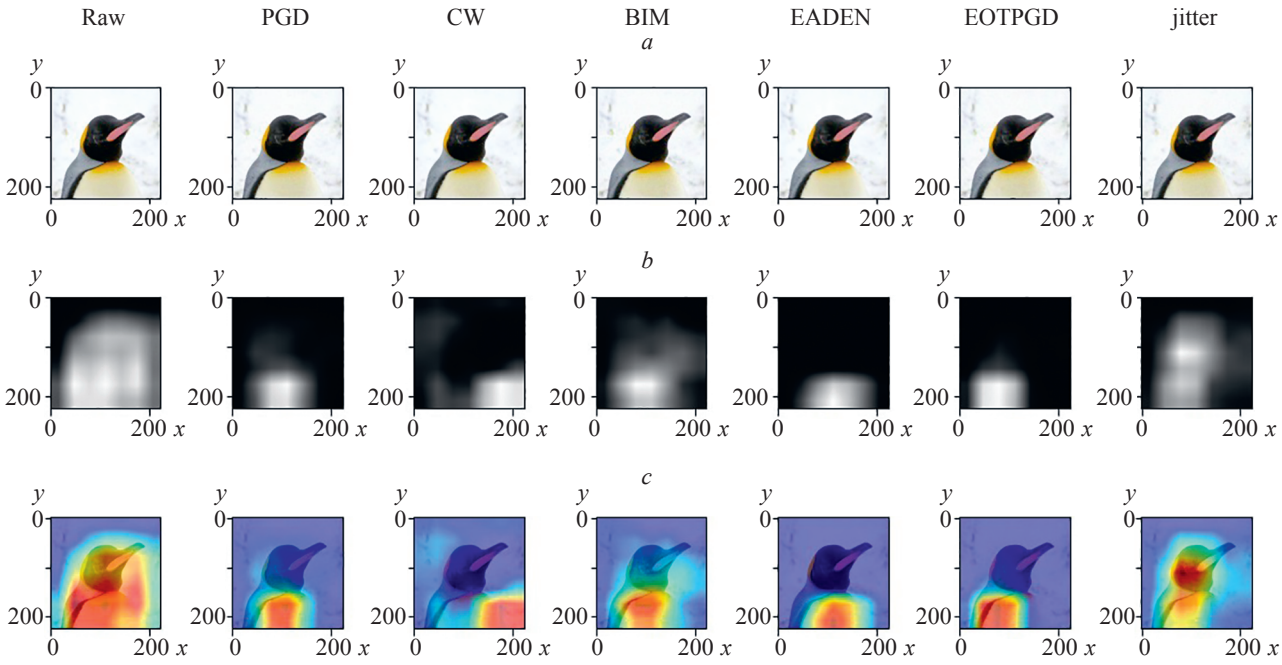


Рис. 1. Сравнение исходного изображения (*a*) с атакуемыми при помощи Grad-CAM (*b*, *c*) на четвертом слое модели ResNet50. Значения по осям *x* и *y* — в пикселах. Jitter — атаки на основе джиттера

Fig. 1. Comparison of the original image (*a*) with the attacked images using Grad-CAM (*b*, *c*) on the fourth layer of the ResNet50 model. The values on the *x* and *y* axes are in pixels. Jitter distortions are attacks based on jitter

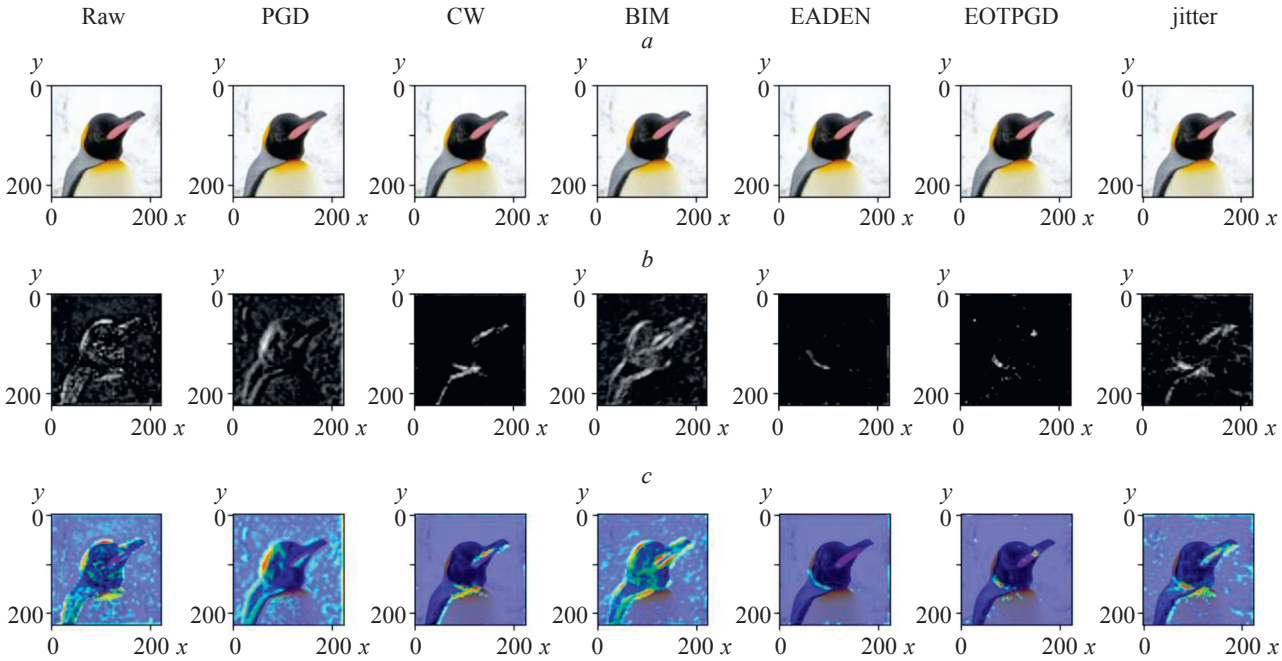


Рис. 2. Сравнение исходного изображения (*a*) с атакуемыми при помощи Grad-CAM (*b*, *c*) на первом слое модели ResNet50. Значения по осям *x* и *y* — в пикселах. Jitter — атаки на основе джиттера

Fig. 2. Comparison of the original image (*a*) with the attacked ones using Grad-CAM (*b*, *c*) on the first layer of the ResNet50 model. The values on the *x* and *y* axes are in pixels. Jitter distortions are attacks based on jitter

ного изображения на «футбольный мяч». На рис. 3 представлена визуализация с использованием t-SNE, а на рис. 4 — интересующая область рис. 3 в увеличении.

На рис. 3 и 4 оси отражают двумерную проекцию признаков, полученных с использованием t-SNE. Несмотря на то, что оси не обладают конкретной физической интерпретацией, взаимное расположение точек показывает степень схожести внутренних представлений изображений в модели [15]. Смещение точек под действием атак свидетельствует о существенном изменении восприятия модели.

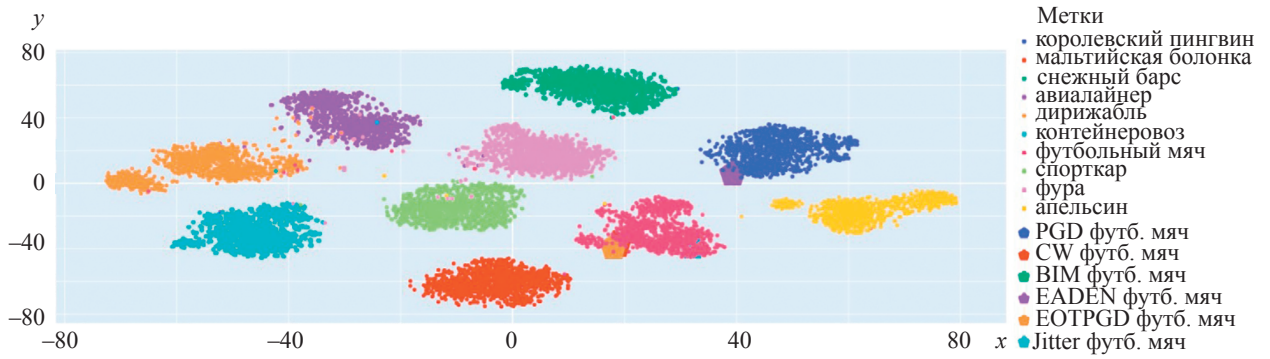


Рис. 3. Кластеризация исходных изображений и изображений, подвергшихся атаке различными методами. Название было изменено с «королевский пингвин» на «футбольный мяч». Значения по осям *x* и *y* – безразмерная компонента проекции признакового вектора

Fig. 3. Clusterization of the original images and images attacked by various methods. The name was changed from “king penguin” to “soccer ball”. The values on the *x* and *y* axes are the dimensionless component of the feature vector projection

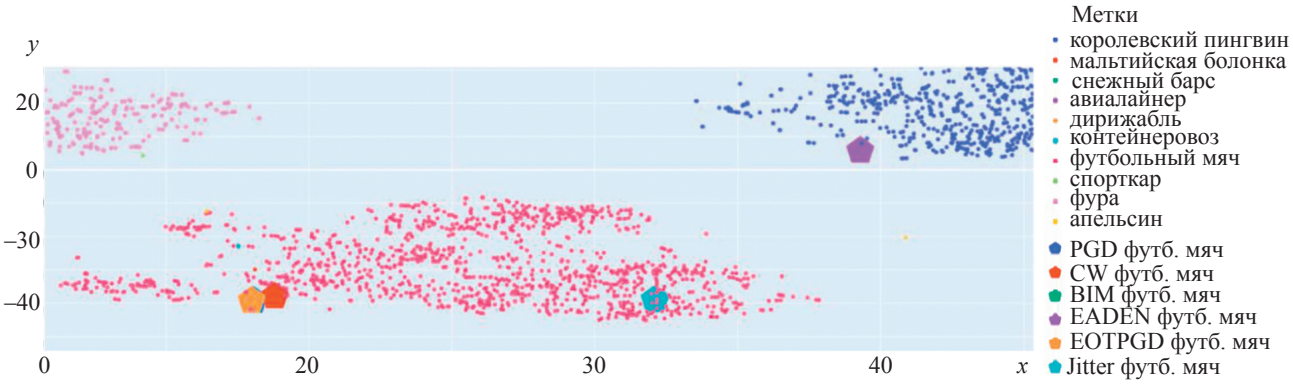


Рис. 4. Кластеризация исходных изображений и изображений, подвергшихся атаке различными методами. Увеличенный фрагмент рис. 3. Название было изменено с «королевский пингвин» на «футбольный мяч». Значения по осям *x* и *y* — безразмерная компонента проекции признакового вектора

Fig. 4. Clusterization of the original images and images attacked by various methods. A closer look at the original and attacked inserts and images. The name was changed from “king penguin” to “soccer ball”. The values on the *x* and *y* axes are the dimensionless component of the feature vector projection

На рис. 4 изображение, сгенерированное алгоритмом EADEN, попадает в тот же кластер, что и исходное изображение. Также из общей группы атакованных изображений выделилось внедрение, сгенерированное в ходе атаки на основе джиттера. Остальные атаки образовали плотный кластер, от которого немного отделился алгоритм CW.

Сравнительные результаты проведенных атак. Для сравнения сходства исходных и атакованных изображений был использован метод скалярного произведения, который позволяет оценить сходство между векторами в заданном пространстве. Полученные сходства представлены в табл. 1.

Таблица 1. Сходства для атакованных и различных классов исходных изображений

Table 1. Similarities for attacked and different classes of pure images

Тип атаки	Скалярное произведение с изображением случайного класса	Скалярное произведение с изображением оригинального класса	Различие между случайным и оригинальным классами	Скалярное произведение с изображением целевого класса	Различие между случайным и целевым классами
PGD	427,38	639,34	211,95	521,20	91,38
CW	376,59	569,24	192,65	430,78	54,18
BIM	415,03	582,20	167,18	450,36	35,33
EADEN	439,24	779,36	340,12	553,97	114,73
EOTPGD	381,65	565,35	183,69	471,10	89,45
Атаки на основе джиттера	413,08	581,48	168,40	588,21	175,14

Атаки, использующие итеративные методы, такие как PGD и BIM, приводят к значительному смещению пространства признаков, что отражается в увеличенных значениях скалярного произведения с изображениями исходного класса. При этом EADEN, основанный на комбинированной $L_1 - L_2$ регуляризации, демонстрирует особо высокие показатели сходства с исходным классом, что говорит о том, что возмущения сохраняют высокий уровень корреляции с оригинальными характеристиками изображения. В то же время атака CW, стремящаяся минимизировать величину возмущений, приводит к относительно невысоким изменениям в представлении, что подтверждается меньшей разницей между случайным и целевым классами. Наиболее эффективной оказалась атака на основе джиттера. Полученные результаты демонстрируют, что в большинстве случаев наблюдается заметная разница в скалярных произведениях атакованных и исходных изображений.

В данной работе атакованные изображения были сгруппированы с помощью алгоритма KNN (с использованием евклидова расстояния), алгоритма поиска с HNSW с косинусным сходством, со сходством L_2 и со сходством внутреннего произведения. В табл. 2 представлен показатель успешности атаки (Attack Success Rate, ASR) различных алгоритмов.

ASR для KNN у большинства методов достаточно высок, что говорит о чувствительности данного метода к возмущениям. Исключением является EADEN с ASR равным 0,0, что указывает на специфику данного метода, при котором возмущения не позволяют существенно сместить пространство признаков.

Для HNSW с косинусным сходством ASR в целом также остается высоким, указывая на чувствительность данного метода в связи с тем, что угловое расстояние между векторами легко изменяется под воздействием атак. Наихудшие результаты были продемонстрированы метрикой HNSW со сходством L_2. ASR равный 1,0 для всех типов атак говорит о практически полном отсутствии устойчивости данной метрики к ним. Подобный результат связан с тем, что для генерации возмущений использовались L_2-оптимизированные методы. Наилучший результат продемонстрировала последняя метрика, где ASR не поднимался выше значения 0,5. Это означает, что внутреннее представление оказывается менее подверженным влиянию атакующих возмущений.

Таким образом, состязательные атаки оказывают неоднородное воздействие на внутреннее представление изображений в модели, что проявляется, как в изменении скалярных произведений, так и в успешности атак на алгоритмы кластеризации. Итеративные методы, направленные на минимизацию возмущений, по-разному смещают признаки, что указывает на сложность их влияния на пространство признаков. Кроме того, результаты демонстрируют важность выбора метрики для кластеризации. Применение HNSW со сходством внутреннего произведения позволяет добиться более высокой устойчивости к атакам, что является критически важным аспектом при разработке систем компьютерного зрения, способных работать в условиях потенциальных угроз.

Обсуждение

Полученные результаты подчеркивают необходимость дальнейших исследований в области повышения стойкости моделей компьютерного зрения к состязательным атакам и разработке методов, позволяющих минимизировать их влияние на качество классификации и кластеризации изображений. Одним из направлений будущих исследований является детализация характеристик, определяющих их восприимчивость к атакам, и определение возможности предсказания по ним успешности атаки без ее проведения. Развитие подобных методов предсказания может позволить автоматизировано адаптировать защитные механизмы модели, в зависимости от потенциальных угроз. Другим перспективным направлением является исследование способов адаптации метрик сходства для повышения устойчивости к атакам. Полученные результаты показали, что использование внутреннего произведения в алгоритме HNSW снижает успешность атак. В этом контексте целесообразно исследовать возможности гибридных метрик, комбинирующих преимущества и учитывающих особенности пространства признаков в процессе кластеризации. Также важным практическим направлением является разработка механизмов защиты, учитывающих специфику выявленных закономерностей. В частности, использование методов регуляризации, направленных на увеличение расстояний между представлениями различных классов или на стабилизацию их относительных позиций в пространстве, может снизить уязвимость модели к атакам.

Таблица 2. Показатели успешности атак при использовании различных алгоритмов кластеризации

Table 2. Attack success rates for different clustering algorithms

Тип атаки	KNN поверх пространства признаков с использованием L_2	Выходные данные модели	HNSW с косинусным сходством	HNSW со сходством L_2	HNSW со сходством внутреннего произведения
PGD	1,00	1,0	1,00	1,0	0,25
CW	0,63	1,0	0,95	1,0	0,11
BIM	1,00	1,0	1,00	1,0	0,37
EADEN	0,00	1,0	0,57	1,0	0,14
EOTPGD	0,89	1,0	0,95	1,0	0,21
Атаки на основе джиттера	1,00	1,0	1,00	1,0	0,50

Заключение

Проведенный анализ показал, что целенаправленные возмущения оказывают неоднозначное влияние на распределение признаковых представлений в модели ResNet50. Сопоставление результатов визуализации посредством метода Gradient-Weighted Class Activation Mapping, изменения показателей сходства и динамики кластеризации продемонстрировали, что итеративные методы атак вызывают выраженное смещение внутренних представлений, в то время как методы с элементами случайных преобразований позволяют сохранить ключевые характеристики исходных изображений.

Полученные результаты указывают на зависимость устойчивости модели от параметров атак и выбора метрик сходства, что проявляется в особенностях формирования кластерных структур. Выявленные закономерности в перераспределении пространства признаков в условиях целенаправленных атак открывают перспективы для дальнейшей оптимизации алгоритмов кластеризации, способных обеспечить более высокую степень защиты систем компьютерного зрения.

Таким образом, выполненное исследование не только подтверждает известные уязвимости современных моделей, но и выявляет дополнительные нюансы взаимодействия атакующих воздействий с внутренней структурой сети, особенно в аспекте кластеризации, что может служить основой для дальнейших научных разработок в данной области.

Литература

1. Liu A. Guo J., Wang J., Liang S., Tao R., Zhou W., Liu C., Liu X., Tao D. X-adv: Physical adversarial object attacks against x-ray prohibited item detection // arXiv. 2023. arXiv:2302.09491. https://doi.org/10.48550/arXiv.2302.09491
2. Goodfellow I.J., Shlens J., Szegedy C. Explaining and harnessing adversarial examples // arXiv. 2015. arXiv:1412.6572. https://doi.org/10.48550/arXiv.1412.6572
3. Madry A., Makelov A., Schmidt L., Tsipras D., Vladu A. Towards deep learning models resistant to adversarial attacks // arXiv. 2019. arXiv:1706.06083. https://doi.org/10.48550/arXiv.1706.06083
4. Carlini N., Wagner D. Towards evaluating the robustness of neural networks // Proc. of the IEEE Symposium on Security and Privacy (SP). 2017. P. 39–57. https://doi.org/10.1109/SP.2017.49
5. Qian Y., He S., Zhao C., Sha J. Wang W., Wang B. Lea2: A lightweight ensemble adversarial attack via non-overlapping vulnerable frequency regions // Proc. of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV). 2023. P. 4487–4498. https://doi.org/10.1109/iccv51070.2023.00416
6. Schlarmann C., Singh N.D., Croce F., Hein M. Robust CLIP: unsupervised adversarial fine-tuning of vision embeddings for robust large vision-language models // Proc. of the 41st International Conference on Machine Learning. 2024. N 1779. P. 43684–43704.
7. He K., Zhang X., Ren S., Sun J. Deep residual learning for image recognition // Proc. of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2016. P. 770–778. https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.90
8. Liu X., Hu J., Yang Q., Jiang M., He J., Fang H. A divide-and-conquer reconstruction method for defending against adversarial example attacks // Visual Intelligence. 2024. V. 2. P. 30. https://doi.org/10.1007/s44267-024-00061-y
9. Zhang J., Wu W., Huang J., Huang Y., Wang W., Su Y., Lyu M. Improving adversarial transferability via neuron attribution-based attacks // Proc. of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2022. P. 14973–14982. https://doi.org/10.1109/CVPR52688.2022.01457
10. Kurakin A., Goodfellow I., Bengio S. Adversarial examples in the physical world // Artificial Intelligence Safety and Security. 2018. P. 14. https://doi.org/10.1201/9781351251389-8
11. Chen P.-Y., Sharma Y., Zhang H., Yi J. & Hsieh C.-J. Ead: Elastic-net attacks to deep neural networks via adversarial examples // Proc. of the 32nd AAAI Conference on Artificial Intelligence. 2018. V. 32. N 1. P. 10–17. https://doi.org/10.1609/aaai.v32i1.11302
12. Zimmermann R.S. Comment on “adv-bnn: Improved adversarial defense through robust bayesian neural network” // arXiv. 2019. arXiv:1907.00895. https://doi.org/10.48550/arXiv.1907.00895
13. Schwinn L., Raab R., Nguyen A., Zanca D., Eskofier B. Exploring misclassifications of robust neural networks to enhance adversarial attacks // Applied Intelligence. 2023. V. 53. N 17. P. 19843–19859. https://doi.org/10.1007/s10489-023-04532-5
14. Selvaraju R.R., Cogswell M., Das A., Vedantam R., Parikh D., Batra D. Grad-cam: Visual explanations from deep networks via gradient-based localization // International Journal of Computer

References

1. Liu A. Guo J., Wang J., Liang S., Tao R., Zhou W., Liu C., Liu X., Tao D. X-adv: Physical adversarial object attacks against x-ray prohibited item detection. *arXiv*, 2023, arXiv:2302.09491. https://doi.org/10.48550/arXiv.2302.09491
2. Goodfellow I.J., Shlens J., Szegedy C. Explaining and harnessing adversarial examples. *arXiv*, 2015, arXiv:1412.6572. https://doi.org/10.48550/arXiv.1412.6572
3. Madry A., Makelov A., Schmidt L., Tsipras D., Vladu A. Towards deep learning models resistant to adversarial attacks. *arXiv*, 2019, arXiv:1706.06083. https://doi.org/10.48550/arXiv.1706.06083
4. Carlini N., Wagner D. Towards evaluating the robustness of neural networks. *Proc. of the IEEE Symposium on Security and Privacy (SP)*, 2017, pp. 39–57. https://doi.org/10.1109/SP.2017.49
5. Qian Y., He S., Zhao C., Sha J. Wang W., Wang B. Lea2: A lightweight ensemble adversarial attack via non-overlapping vulnerable frequency regions. *Proc. of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV)*, 2023, pp. 4487–4498. https://doi.org/10.1109/iccv51070.2023.00416
6. Schlarmann C., Singh N.D., Croce F., Hein M. Robust CLIP: unsupervised adversarial fine-tuning of vision embeddings for robust large vision-language models. *Proc. of the 41st International Conference on Machine Learning*, 2024, no. 1779. pp. 43684–43704.
7. He K., Zhang X., Ren S., Sun J. Deep residual learning for image recognition. *Proc. of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2016, pp. 770–778. https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.90
8. Liu X., Hu J., Yang Q., Jiang M., He J., Fang H. A divide-and-conquer reconstruction method for defending against adversarial example attacks. *Visual Intelligence*, 2024, vol. 2, pp. 30. https://doi.org/10.1007/s44267-024-00061-y
9. Zhang J., Wu W., Huang J., Huang Y., Wang W., Su Y., Lyu M. Improving adversarial transferability via neuron attribution-based attacks. *Proc. of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2022, pp. 14973–14982. https://doi.org/10.1109/CVPR52688.2022.01457
10. Kurakin A., Goodfellow I., Bengio S. Adversarial examples in the physical world. *Artificial Intelligence Safety and Security*, 2018, pp. 14. https://doi.org/10.1201/9781351251389-8
11. Chen P.-Y., Sharma Y., Zhang H., Yi J. & Hsieh C.-J. Ead: Elastic-net attacks to deep neural networks via adversarial examples. *Proc. of the 32nd AAAI Conference on Artificial Intelligence*, 2018, vol. 32, no. 1, pp. 10–17. https://doi.org/10.1609/aaai.v32i1.11302
12. Zimmermann R.S. Comment on “adv-bnn: Improved adversarial defense through robust bayesian neural network”. *arXiv*, 2019, arXiv:1907.00895. https://doi.org/10.48550/arXiv.1907.00895
13. Schwinn L., Raab R., Nguyen A., Zanca D., Eskofier B. Exploring misclassifications of robust neural networks to enhance adversarial attacks. *Applied Intelligence*, 2023, vol. 53, no. 17, pp. 19843–19859. https://doi.org/10.1007/s10489-023-04532-5
14. Selvaraju R.R., Cogswell M., Das A., Vedantam R., Parikh D., Batra D. Grad-cam: Visual explanations from deep networks via gradient-based localization. *International Journal of Computer*

Vision. 2020. V. 128. N 2. P. 336–359. https://doi.org/10.1007/s11263-019-01228-7
15. van der Maaten L., Hinton G. Visualizing data using t-SNE // Journal of Machine Learning Research. 2008. V. 9. P. 2579–2605.
16. Fix E., Hodges J. Discriminatory Analysis. Nonparametric Discrimination: Consistency Properties. USAF School of Aviation Medicine, 1951. 44 p.
17. Malkov Y.A., Yashunin D.A. Efficient and robust approximate nearest neighbor search using hierarchical navigable small world graphs // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2020. V. 42. N 4. P. 824–836. https://doi.org/10.1109/TPAMI.2018.2889473
18. ImageNet Large Scale Visual Recognition Challenge (ILSVRC). Stanford Vision Lab, Stanford University, Princeton University. ImageNet Data [Электронный ресурс]. URL: https://www.image-net.org/download.php. (дата обращения: 03.03.2025).

Vision, 2020, vol. 128, no. 2, pp. 336–359. https://doi.org/10.1007/s11263-019-01228-7
15. van der Maaten L., Hinton G. Visualizing data using t-SNE. *Journal of Machine Learning Research*, 2008, vol. 9, pp. 2579–2605.
16. Fix E., Hodges J. *Discriminatory Analysis. Nonparametric Discrimination: Consistency Properties*. USAF School of Aviation Medicine, 1951, 44 p.
17. Malkov Y.A., Yashunin D.A. Efficient and robust approximate nearest neighbor search using hierarchical navigable small world graphs. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2020, vol. 42, no. 4, pp. 824–836. https://doi.org/10.1109/TPAMI.2018.2889473
18. *ImageNet Large Scale Visual Recognition Challenge (ILSVRC)*. Stanford Vision Lab, Stanford University, Princeton University. ImageNet Data [Электронный ресурс]. Available at: https://www.image-net.org/download.php. (accessed: 03.03.2025).

Авторы

Болозовский Роман Ростиславович — аспирант, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, 197022, Российская Федерация, https://orcid.org/0009-0004-5725-0526, bolozovskii@gmail.com

Левина Алла Борисовна — кандидат физико-математических наук, доцент, доцент, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, 197022, Российская Федерация, sc 56427692900, https://orcid.org/0000-0003-4421-2411, Alla_levina@mail.ru

Красов Константин Сергеевич — младший научный сотрудник, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, 197022, Российская Федерация, https://orcid.org/0009-0005-9232-5463, iflup@ya.ru

Authors

Roman R. Bolozovskii — PhD Student, Saint Petersburg Electrotechnical University “LETI”, Saint Petersburg, 197022, Russian Federation, https://orcid.org/0009-0004-5725-0526, bolozovskii@gmail.com

Alla B. Levina — PhD (Physics & Mathematics), Associate professor, Associate Professor, Saint Petersburg Electrotechnical University “LETI”, Saint Petersburg, 197022, Russian Federation, sc 56427692900, https://orcid.org/0000-0003-4421-2411, Alla_levina@mail.ru

Konstantin S. Krasov — Junior Researcher, Saint Petersburg Electrotechnical University “LETI”, Saint Petersburg, 197022, Russian Federation, https://orcid.org/0009-0005-9232-5463, iflup@ya.ru

Статья поступила в редакцию 05.03.2025
Одобрена после рецензирования 30.05.2025
Принята к печати 20.07.2025

Received 05.03.2025
Approved after reviewing 30.05.2025
Accepted 20.07.2025

Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ
июль–август 2025 Том 25 № 4 http://ntv.ifmo.ru/
SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL OF INFORMATION TECHNOLOGIES, MECHANICS AND OPTICS
Jule–August 2025 Vol. 25 No 4 http://ntv.ifmo.ru/en/
ISSN 2226-1494 (print) ISSN 2500-0373 (online)

doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-4-703-709
УДК 003.26

Протокол пересечения множеств с сохранением конфиденциальности

Иван Дмитриевич Иогансон✉

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация
ivan.ioganson@yandex.ru✉, https://orcid.org/0000-0002-0856-2249

Аннотация

Введение. Протокол пересечения закрытых множеств (Private Set Intersection, PSI) является одним из фундаментальных примитивов конфиденциальных вычислений. Данный примитив позволяет нескольким сторонам, которые не доверяют друг другу, совместными усилиями вычислить пересечение их секретных множеств без разглашения при этом дополнительной информации об этих множествах. Это позволяет пользователям совместно проводить анализ данных без раскрытия конфиденциальной информации друг другу. **Метод.** В работе представлен новый протокол пересечения закрытых множеств для трех и более участников. Протокол работает в сети с топологией типа «кольцо». Это минимизирует количество необходимых каналов связи между пользователями. Протокол основан на идее условного разделения нуля, позволяющей использовать схему разделения секрета для определения принадлежности элемента множества всем пользователям. Для оценки быстродействия нового решения предложена программная реализация протокола на языке C++. **Основные результаты.** Показана безопасность разработанного протокола для трех и более пользователей при условии, что пользователи не будут сговариваться друг с другом для «Honest-But-Curious» модели злоумышленника. Предложенная модель подразумевает, что злоумышленником является один из участников протокола, который корректно выполняет протокол, но может анализировать полученную в ходе этого информацию для извлечения выгоды. Безопасность протокола основывается только на предположении о недостатке у злоумышленника информации для получения каких-либо полезных данных из полученных во время выполнения протокола сообщений. Таким образом, этот протокол обладает информационно-теоретической стойкостью. **Обсуждение.** Представленный протокол может быть использован для конфиденциального анализа данных, например, при обмене несколькими компаниями информацией об общих клиентах. Протокол позволяет трем пользователям найти пересечение множеств размера 10^6 примерно за 42 с. В настоящей реализации существует возможность добавления многопоточности или перенос вычислений больших матриц с процессора на графический ускоритель.

Ключевые слова

конфиденциальные вычисления, криптографический протокол, пересечение закрытых множеств, разделение секрета

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания (проект № FSER-2025-0003).

Ссылка для цитирования: Иогансон И.Д. Протокол пересечения множеств с сохранением конфиденциальности // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2025. Т. 25, № 4. С. 703–709. doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-4-703-709

Set intersection protocol with privacy preservation

Ivan D. Ioganson✉

ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation
ivan.ioganson@yandex.ru✉, https://orcid.org/0000-0002-0856-2249

Abstract

The Private Set Intersection Protocol (PSI) is one of the fundamental primitives of secure multi-party computations. This primitive allows several parties who do not trust each other to work together to calculate the intersection of their secret

© Иогансон И.Д., 2025

sets without disclosing additional information about these sets. This allows users to jointly analyze data without revealing confidential information to each other. This paper describes a new protocol for the intersection of private sets for 3 or more participants. The protocol works in a network with a “ring” type topology which minimizes the number of necessary communication channels between users. The protocol is based on the idea of conditional zero-sharing which allows using a secret sharing scheme to determine whether an element of the set belongs to all users or not. To evaluate the performance of the proposed solution, a software implementation of the protocol in C++ is proposed. The security of the developed protocol for three or more users is shown, provided that users do not conspire with each other for an “Honest-But-Curious” attacker model. Proposed model implies that the attacker is one of the protocol participants who performs the protocol correctly, but can analyse the information obtained during this process to gain benefits. The security of the protocol is based only on the assumption that the attacker lacks information to obtain any useful data from the messages received during the protocol execution. Thus, this protocol is information-theoretically secure. The presented protocol can be used for confidential data analysis, for example, when several companies exchange information about common customers. The protocol allows three users to find the intersection of sets of sizes 10^6 in about 42 s. In the present implementation, it is possible to add multithreading or transfer large matrix calculations from the processor to the GPU.

Keywords
secure multi-party computations, cryptographic protocol, private set intersection, secret sharing

Acknowledgements
The research was carried out within the State Assignment (project No. FSER-2025-0003).

For citation: Ioganson I.D. Set intersection protocol with privacy preservation. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2025, vol. 25, no. 4, pp. 703–709 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-4-703-709

Введение

На сегодняшний день широкое распространение находят протоколы конфиденциальных вычислений, которые позволяют производить вычисления между несколькими сторонами, не раскрывая при этом их входные данные друг другу [1]. Одним из таких протоколов является протокол пересечения закрытых множеств (Private Set Intersection, PSI) [2–6], и он позволяет группе пользователей, у каждого из которых есть некий набор элементов, найти пересечение их наборов, не раскрывая при этом никакой дополнительной информации. Вариациями подобного протокола можно считать, например, протокол порогового PSI [7] или протокол нахождения мощности PSI [8].

Протоколы PSI находят широкое применение в различных областях [9]. Использование подобных протоколов позволяет повысить уровень конфиденциальности данных, что может быть важно при работе с чувствительной информацией. Одним из примеров может служить обмен конфиденциальными данными между организациями [10]. В таком случае обеспечение защиты информации при передаче будет иметь первостепенное значение, и протокол PSI может помочь предотвратить разглашение дополнительной информации. Другим примером применения может служить использование протоколов PSI в сфере медицины, в частности генетике. С развитием исследований в области генетики человека стало возможным записывать геном человека в цифровом виде, что в свою очередь порождает угрозу безопасности этих данных. Протокол PSI позволяет безопасно проводить такие операции, как тестирование на отцовство и родословную без раскрытия какой-либо дополнительной геномной информации о человеке [11, 12].

Существуют различные подходы к реализации протокола PSI. Их можно разделить на использующие и не использующие третью доверенную сторону. Реализации с использованием третьей доверенной стороны подразумевают наличие сервера, которому участники протокола посылают свои секретные множества, чтобы он вычислил их пересечение и выдал ответ. Такой подход наиболее эффективен с точки зрения производительности, однако требует большого допущения с точки зрения безопасности, а именно того, что сам сервер не скомпрометирован и может сохранить состояние конфиденциальности переданной ему информации. Исходя из этого, в данной работе будут рассмотрены подходы, не требующие третьей доверенной стороны.

Наивным подходом к реализации протокола PSI без третьей доверенной стороны является вычисление некой криптографической хеш-функции от каждого из элементов секретных множеств участников и последующее сравнение полученных значений. Данный подход позволяет скрыть секретные значения благодаря использованию односторонней хеш-функции [13]. Несмотря на то, что свойства хеш-функции не позволяют однозначно восстановить входное значение по выходному в общем случае, часто элементы секретных множеств пользователей в протоколе PSI не являются полностью случайными, а берутся из определенного и вполне конечного пространства допустимых значений (например: номера телефонов, имена людей, почтовые индексы). Знание того, из какого пространства значений взяты элементы множества может позволить злоумышленнику восстановить элементы множеств из выходных значений хеш-функции и привести к тому, что данный подход не будет безопасен.

Другой подход к построению протокола PSI основан на примитиве, называемом забывчивая псевдослучайная функция (Oblivious Pseudorandom Function, OPRF) [14–17]. OPRF — протокол, который позволяет получателю узнать значение некой псевдослучайной функции, известной отправителю, причем так, чтобы отправитель не узнал ни входных данных получателя, ни итогового значения. Данный примитив, в свою очередь, основывается на так называемом протоколе забывчивой передачи [18, 19], который позволяет получателю узнать одно и только одно из нескольких сообщений, отправленных ему отправителем, причем так, что от-

правитель не узнает, какое из сообщений было принято получателем.

Целью данной работы является снижение объема передаваемой в процессе работы протокола информации. Представлен анализ существующих решений. Разработан протокол PSI. Исследованы быстродействие, затраты на коммуникацию и безопасность разработанного протокола. Выполнено сравнение предложенного решения с аналогами.

Дано описание нового протокола PSI для трех и более участников, основанного на идеях схем разделения секрета. Основной особенностью данного решения является использование топологии сети «Кольцо». Это позволяет снизить нагрузку на отдельного участника. В предложенном решении каждый участник отправляет и принимает в процессе работы протокола всего по два сообщения. В работе также представлен метод выбора параметров для протокола. Для оценки быстродействия предложенного решения была разработана программная реализация протокола на языке C++.

Описание предложенного метода

Обозначения, используемые в работе. Идея представленного протокола основана на концепции условного разделения нуля, предложенного в работе [20]. Пусть $\mathbf{M}$ — матрица $n \times w$, состоящая из битовых строк длины m. Пусть $\mathbf{M}[x][y]$ обозначает элемент матрицы $\mathbf{M}$ на пересечении x-го столбца и y-ой строки. Каждый пользователь P_i для $i \in \{1, \ldots, t\}$, где t — количество участвующих в протоколе пользователей, имеет множество $\mathbf{X}_i$ длины u_i.

В протоколе используется простейшая схема разделения секрета для распределения нулевой матрицы на доли. Пусть $\mathbf{0}^{n\times w}$ обозначает нулевую матрицу размерности $n \times w$. Тогда нулевую матрицу можно разделить на t долей $\mathbf{Z}_i$, где $i \in \{1, \ldots, t\}$, таким образом, что:

$$\mathbf{0}^{n\times w} = \mathbf{Z}_1 \oplus \mathbf{Z}_2 \oplus \ldots \oplus \mathbf{Z}_t,$$

где символ $\oplus$ — поэлементная побитовая операция исключающие «ИЛИ» матриц.

Также в протоколе используется криптографическая хеш-функция H_1: $\{0, 1\}^* \to \{1, \ldots, n\}^w$.

Описание протокола. Пользователь P_1 инициирует протокол, и в конце получает выходное значение $\mathbf{I}$ — пересечение всех множеств. Участники предварительно договариваются о параметрах m, n и w.

Создание протокола можно условно разделить на три этапа.

Этап 1. **Генерация матрицы нулей.**

Шаг 1.1. Пользователь P_1 генерирует случайную матрицу $\mathbf{M}_1 \xleftarrow{\$} \{\{0, 1\}^m\}^{n\times w}$.

Шаг 1.2. Каждый пользователь P_i для $i \in \{2, \ldots, t\}$:

1.2.1. получает от пользователя P_{i-1} матрицу $\mathbf{M}_{i-1}$;

1.2.2. генерирует случайную матрицу $\mathbf{Z}_i \xleftarrow{\$} \{\{0, 1\}^m\}^{n\times w}$;

1.2.3. отправляет пользователю P_{i+1} матрицу $\mathbf{M}_i = \mathbf{M}_{i-1} \oplus \mathbf{Z}_i$.

Шаг 1.3. Пользователь P_1 получает от пользователя P_t матрицу $\mathbf{M}_t$.

Шаг 1.4. Пользователь P_1 вычисляет $\mathbf{Z}_1 = \mathbf{M}_t \oplus \mathbf{M}_1$.

Этап 2. **Сбор информации о множествах.**

Каждый пользователь P_i для $i \in \{1, \ldots, t\}$:

Шаг 2.1. Если $i = 1$, то генерирует случайную матрицу $\mathbf{B}_0 \xleftarrow{\$} \{\{0, 1\}^m\}^{n\times w}$. Иначе, получает от пользователя P_{i-1} матрицу $\mathbf{B}_{i-1}$.

Шаг 2.2. Генерирует случайную матрицу $\mathbf{A}_i \xleftarrow{\$} \{\{0, 1\}^m\}^{n\times w}$.

Шаг 2.3. Для каждого x_{ij} из множества $\mathbf{X}_i$ вычисляет $\mathbf{v}_j = H_1(x_{ij}) \in \{1, \ldots, n\}^w$ для $j \in \{1, \ldots, u_i\}$.

Шаг 2.4. Для каждого $\mathbf{v}_j$ обновляет значения $\mathbf{A}_i[l][\mathbf{v}_j[l]] = \mathbf{Z}_i[l][\mathbf{v}_j[l]]$ для $l \in \{1, \ldots, w\}$.

Если $i < t$, то вычисляет матрицу $\mathbf{B}_i = \mathbf{B}_{i-1} \oplus \mathbf{A}_i$ и отправляет ее пользователю P_{i+1}. Иначе, вычисляет матрицу $\mathbf{B}_t = \mathbf{B}_{t-1} \oplus \mathbf{A}_t$ и отправляет ее пользователю P_1.

Этап 3. **Поиск пересечения.**

Шаг 3.1. Пользователь P_1 имеет матрицы $\mathbf{B}_0$ и $\mathbf{B}_t$.

Шаг 3.2. Пользователь P_1 вычисляет $\mathbf{C} = \mathbf{B}_0 \oplus \mathbf{B}_t$.

Шаг 3.3. Пусть $\mathbf{I} = \varnothing$.

Шаг 3.4. Пользователь P_1 для каждого элемента x_{1j}, где $j \in \{1, \ldots, u_1\}$, из множества $\mathbf{X}_1$:

3.4.1. вычисляет $\mathbf{v}_j^{(1)} = H_1(x_{1j}) \in \{1, \ldots n\}^w$;

3.4.2. проверяет выполняется ли равенство:

$$\mathbf{C}[1]\left[\mathbf{v}_j^{(1)}[1]\right] = \mathbf{C}[2]\left[\mathbf{v}_j^{(1)}[2]\right] = \cdots = \mathbf{C}[w]\left[\mathbf{v}_j^{(1)}[w]\right] = 0;$$

3.4.3. если равенство выполняется, то $\mathbf{I} = \mathbf{I} \cup \{x_1 j\}$.

Пример работы протокола. Рассмотрим наглядный пример работы протокола для трех пользователей.

Пусть входные множества пользователей будут три случайные строки ASCII символов:

$$\mathbf{X}_1 = \{\text{«nH/»}, \text{«0Kn»}, \text{«–W9»}\},$$
$$\mathbf{X}_2 = \{\text{«0Kn»}, \text{«sNd»}, \text{«FKh»}\},$$
$$\mathbf{X}_3 = \{\text{«S2P»}, \text{«iDt»}, \text{«0Kn»}\}.$$

Выберем в качестве параметров протокола значения $(m, n, w) = (8, 4, 8)$. Тогда соответственными значениями хеш-функции H_1: $\{0, 1\}^* \to \{1, \ldots, n\}^w$ для этих строк будут:

$$H_1(\mathbf{X}_1) = \{(0, 1, 3, 3, 3, 2, 3, 1), (1, 0, 0, 2, 1, 3, 3, 1), (2, 2, 0, 1, 3, 1, 3, 0)\},$$
$$H_1(\mathbf{X}_2) = \{(1, 0, 0, 2, 1, 3, 3, 1), (0, 3, 2, 1, 3, 0, 2, 1), (2, 2, 1, 3, 3, 2, 1, 3)\},$$
$$H_1(\mathbf{X}_3) = \{(0, 2, 1, 2, 3, 1, 0, 1), (2, 2, 0, 0, 3, 1, 2, 1), (1, 0, 0, 2, 1, 3, 3, 1)\}.$$

На этапе 1 создания протокола генерируются доли нулевой матрицы:

$$\mathbf{Z}_1 = \begin{pmatrix} 96 & d7 & 78 & 96 & f7 & 50 & b2 & d8 \\ 0a & ec & ee & 84 & 19 & d0 & a1 & b1 \\ 01 & 01 & 0a & 5e & e5 & a6 & 86 & 8e \\ 06 & 0e & 46 & 6e & e6 & 59 & 3b & 44 \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{Z}_2 = \begin{pmatrix} 8b & f6 & d1 & 5c & 1a & b3 & a0 & 1f \\ 84 & 9e & a0 & 16 & f4 & 88 & 73 & 2e \\ 38 & 58 & 6f & 36 & 72 & f5 & f1 & e3 \\ 11 & 67 & f3 & 17 & 00 & 39 & e1 & 62 \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{Z}_3 = \begin{pmatrix} 1d & 21 & a9 & ca & ed & e3 & 12 & c7 \\ 8e & 72 & 4e & 92 & ed & 58 & d2 & 9f \\ 39 & 59 & 65 & 68 & 97 & 53 & 77 & 6d \\ 17 & 69 & b5 & 79 & e6 & 60 & da & 26 \end{pmatrix}.$$

Элементы матрицы представляют из себя в данном случае 8-битные строки, записанные в шестнадцатеричном виде. Можно заметить, что выполняется равенство $\mathbf{Z}_1 \oplus \mathbf{Z}_2 \oplus \mathbf{Z}_3 = \mathbf{0}^{n \times w}$.

На этапе 2 — пользователи генерируют матрицы $\mathbf{A}_1$, $\mathbf{A}_2$ и $\mathbf{A}_3$ на основе своих входных множеств и матриц $\mathbf{Z}_1$, $\mathbf{Z}_2$, $\mathbf{Z}_3$:

$$\mathbf{A}_1 = \begin{pmatrix} 96 & d7 & 78 & 96 & f7 & 50 & b2 & d8 \\ 0a & ec & 24 & 84 & 19 & d0 & 11 & b1 \\ 01 & 01 & 0a & 5e & d4 & a6 & a3 & e6 \\ d6 & 71 & 46 & 6e & e6 & 59 & 3b & f8 \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{A}_2 = \begin{pmatrix} 8b & f6 & d1 & bc & eb & b3 & fd & 81 \\ 84 & ab & a0 & 16 & f4 & 2f & 73 & 2e \\ 38 & 58 & 6f & 36 & be & f5 & f1 & e4 \\ 1f & 67 & b5 & 17 & 00 & 39 & e1 & 62 \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{A}_3 = \begin{pmatrix} 1d & 21 & a9 & ca & 1a & 85 & 12 & 6f \\ 8e & ee & 4e & 21 & ed & 58 & 06 & 9f \\ 39 & 59 & 65 & 68 & 0e & 97 & 77 & c4 \\ 25 & 09 & 78 & 48 & e6 & 60 & da & b7 \end{pmatrix}.$$

На этапе 3 — пользователь P_1 получает матрицу $\mathbf{C}$:

$$\mathbf{C} = \begin{pmatrix} 00 & 00 & 00 & 04 & 1f & c0 & 77 & 36 \\ 00 & a9 & ca & b3 & 00 & a7 & 64 & 00 \\ 00 & 00 & 3c & 00 & 64 & c4 & 25 & c6 \\ 8c & 1f & 8b & 31 & 00 & 00 & 00 & 2d \end{pmatrix}.$$

Для матрицы $\mathbf{C}$ выполняется равенство $\mathbf{C} = \mathbf{A}_1 \oplus \oplus \mathbf{A}_2 \oplus \mathbf{A}_3$. Очевидно, что пересечение, полученное в результате работы протокола, будет $\mathbf{I} = \{\text{«0Kn»}\}$.

Исследование предложенного метода

Безопасность протокола. Разработанный протокол безопасен для «Honest-But-Curious» модели злоумышленника при дополнительном условии, что пользователи не будут сговариваться между собой, и количестве участников не менее трех. Подобная модель предполагает, что злоумышленник, являясь одним из участников протокола, честно следует самому протоколу, однако также может анализировать полученную в ходе протокола информацию, для получения интересующих его сведений. Это означает, что пока участники соблюдают протокол, они не узнают ничего о секретных множествах друг друга, кроме результата работы протокола.

Протокол обладает информационно-теоретической стойкостью. Это означает, что его безопасность основана только на предположении, что злоумышленник не обладает достаточной информацией для взлома. В отличии от вычислительно стойких криптосистем, безопасность которых основывается на предположении о вычислительной сложности определенной математической задачи (например, факторизация числа или вычисление дискретного логарифма), информационно-теоретически стойкие системы невозможно взломать даже имея неограниченные вычислительные мощности.

Для обоснования надежности разработанного протокола обратимся к этапам создания протокола. На этапе 2 каждый пользователь P_i получает от пользователя P_{i-1} матрицу $\mathbf{B}_{i-1}$, формирует на основе своего секретного множества матрицу $\mathbf{A}_i$ и отправляет пользователю P_i матрицу $\mathbf{B}_i = \mathbf{B}_{i-1} \oplus \mathbf{A}_i$. По факту именно матрица $\mathbf{A}_i$ содержит информацию о множестве пользователя P_i. В данной матрице часть элементов случайно сгенерирована, а часть взята из матрицы $\mathbf{Z}_i$, сгенерированной на этапе 1. Однако элементы матрицы $\mathbf{Z}_i$ не отличимы от случайных. Потому, не имея информации об элементах матрицы $\mathbf{Z}_i$, невозможно отличить те элементы, что были сгенерированы на этапе 2, от тех, что были взяты из матрицы $\mathbf{Z}_i$. Если принять предположение о том, что пользователи не могут сговариваться между собой, то ни один пользователь не может получить информацию об элементах матрицы $\mathbf{Z}_i$ другого пользователя на этапе 1.

Единственным исключением будет случай, когда количество пользователей равно двум. В этом случае, так как известно, что $\mathbf{Z}_1 \oplus \mathbf{Z}_2 = \mathbf{0}^{n \times w}$, каждый пользователь, зная свою долю нулевой матрицы, может вычислить долю, принадлежащую другому. В связи с этим для данного случая протокол небезопасен.

Выбор параметров протокола. Быстродействие протокола напрямую зависит от выбранных параметров (m, n, w), а также от количества участников t и количества элементов множеств каждого из пользователей. Для упрощения предположим, что количество элементов входного множества у каждого из участников равно u, а количество элементов пересечения множеств пользователей равно q. Параметры протокола выбираются в зависимости значения $R(m, n, w, t, u, q)$ — вероятности того, что в результате работы протокол выдаст некорректный результат. Это может произойти, если на шаге 3.4.2 этапа 3 протокола равенство будет выполнено для элемента, не принадлежащего пересечению.

Чтобы вычислить значение $R(m, n, w, t, u, q)$, для начала следует оценить вероятность того, что элемент матрицы $\mathbf{C}$, полученной на шаге 3.2 этапа 3 протокола, находящийся на пересечении x-го столбца и y-ой строки, равен нулю. Рассмотрим некий элемент s, принадлежащий входному множеству одного из пользователей, и соответствующее ему значение $\mathbf{v} = H_1(s) \in \{1, \ldots, n\}^w$ — значение хеш-функции для этого элемента s. Тогда есть три случая, когда $\mathbf{C}[x][y]$ будет равен 0.

Случай 1. Если $y = \mathbf{v}[x]$ для хотя бы одного значения $\mathbf{v}$ соответствующего элементу s из пересечения.

Случай 2. Если случай 1 не выполняется и для каждого участника существует хотя бы один элемент s и соответствующее ему значение $\mathbf{v}$, такое, что $y = \mathbf{v}[x]$.

Случай 3. Если случаи 1 и 2 не выполняются, то $\mathbf{C}[x][y]$ — случайный элемент из $\{0, 1\}^m$ и может так получиться, что он равен 0.

Соответствующие вероятности для каждого из этих случаев и общая вероятность:

$$p_1 = 1 - \left(1 - \frac{1}{n}\right)^q;$$

$$p_2 = \left(1 - \left(1 - \frac{1}{n}\right)^{u-q}\right)^{t-1};$$

$$p_3 = 2^{-m};$$

$$Prob(\mathbf{C}[x][y] = 0) = p_1 + (1 - p_1)(p_2 + (1 - p_2)p_3).$$

Тогда $R(m, n, w, t, u, q)$ будет:

$$R(m, n, w, t, u, q) = 1 - (1 - Prob(\mathbf{C}[x][y] = 0)^w)^{u-q}. \quad (1)$$

Формула (1) позволяет определить примерную вероятность ошибки для заданных значений m, n, w, t, u, q. Основной недостаток состоит в том, что изначально не может быть известно значение q, так как оно станет известно только в конце работы протокола. Следовательно, для определения параметров (m, n, w) для заданных значений t и u, а также желаемой вероятности ошибки p, следует использовать формулу:

$$\max_{q \in \{0 \ldots u\}} R(m, n, w, t, u, q) \le p\ . \quad (2)$$

Обсуждение

Для оценки быстродействия представленного протокола была реализована программа на языке C++. Программа симулировала выполнение протокола на локальной машине в одном потоке, используя процессор AMD Ryzen 7 5800H. Таким образом, было замерено среднее время работы протокола для разных параметров. Отметим, что полученное среднее время не учитывает передачу данных по сети. Всего в процессе работы протокола по сети отправляется $2 \times t \times m \times n \times w$ бит информации за $2 \times t$ раундов коммуникации.

В табл. 1 приведены время работы протокола и количество переданной информации для разного количества участвующих сторон t и размеров входных данных u. Для заданной вероятности ошибки p были выбраны подходящие параметры (m, n, w) на основании формулы (2).

В табл. 2 приведено сравнение предложенного решения с аналогами. В качестве параметров для сравнения взяты объем трафика на пользователя и количество раундов коммуникации приведены асимптотические приближения от параметров u, t и к, где u и t были определены по табл. 1, а к — статистическая безопасность, зависящая от параметра p. Статистическая безопасность связана с вероятностью ошибки p соотношением $\text{к} = -\log_2 p$.

Из табл. 2 видно, что только предложенное решение требует топологии сети «Кольцо», для которой необходимо меньшее количество активных соединений, чем для полносвязной топологии, поэтому ее проще настраивать. Также некоторые протоколы запрашивают константного числа раундов коммуникации, но это увеличивает количество трафика, приходящегося на пользователя. В работах [5, 6, 15] количество передаваемой информации зависит от количества участников протокола, а в предложенном решении объем переданной информации зависит только от размера входных данных и параметра статистической безопасности.

Отметим, что только в работе [20] объем трафика на пользователя соизмерим с тем же объемом в пред-

Таблица 1. Производительность протокола

Table 1. Protocol performance

t	u	(m, n, w)	p	Количество переданной информации, МБ	Время работы протокола, с
3	10^3	(8, 2000, 20)	10^{-6}	0,234	0,027
3	10^4	(8, 20 000, 25)	10^{-6}	2,860	0,340
3	10^5	(8, 200 000, 25)	10^{-6}	28,600	2,800
3	10^6	(8, 1 000 000, 50)	10^{-6}	286,100	42,400
4	10^4	(8, 20 000, 25)	10^{-6}	3,810	0,330
4	10^5	(8, 200 000, 25)	10^{-6}	38,100	3,700
5	10^5	(8, 200 000, 25)	10^{-6}	47,700	4,800
8	10^5	(8, 200 000, 25)	10^{-6}	76,300	6,900
10	10^5	(8, 200 000, 25)	10^{-6}	95,400	8,400

Таблица 2. Сравнение предложенного протокола с аналогами

Table 2. Comparison with analogues

Протокол	Объем трафика на пользователя	Количество раундов коммуникации	Топология сети	Наличие доверенной стороны
[15]	$O(u \times t \times \text{к})$	$O(1)$	Полносвязная	Да
[6]	$O(u \times t^2 \times \text{к})$	$O(1)$	Полносвязная	Нет
[20]	$O(u \times \text{к})$	$O(t)$	Полносвязная	Нет
[5]	$O(u \times t \times \text{к})$	$O(1)$	Полносвязная	Нет
Предложенное решение	$O(u \times \text{к})$	$O(t)$	Кольцо	Нет

ложенном решении. Также в [20] при размере входных множеств равном 2^{20} и вероятности ошибки — 2^{-40} коммуникационные затраты на пользователя составляют 447,44 и 935,32 МБ для двух вариантов протокола. В описанном в настоящей работе протоколе каждый пользователь передает и получает суммарно $4 \times m \times n \times w$ бит информации, что при таком же размере входных данных и вероятности ошибки будет соответствовать параметрам $(m, n, w) = (8, 2^{20}, 80)$ и равно 320 МБ информации, что в 1,4 и 2,9 раз меньше, чем коммуникационные затраты для протоколов, описанных в [20].

Заключение

В работе описан новый протокол поиска пересечения множеств с сохранением конфиденциальности, основанный на идее условного разделения нуля, предложенного в [20]. Данный протокол обладает информационно-теоретической стойкостью для трех и более пользователей, при условии, что пользователи не будут сговариваться друг с другом. Основной отличительной особенностью данного протокола является тот факт, что для своей работы он требует топологии сети «Кольцо», что позволяет снизить количество активных соединений между участниками. Также, в отличии от многих других подобных протоколов, объем трафика, передаваемого одним пользователем, не зависит от общего числа пользователей. Разработана программная реализация протокола на языке C++ для оценки быстродействия предложенного решения. Протокол позволяет находить пересечение множеств размера 10^6 для трех пользователей примерно за 42 с, что говорит о его практическом применении. Кроме того, время работы протокола, может быть в дальнейшем улучшено путем распараллеливания вычислений.

Литература

1. Evans D., Kolesnikov V., Rosulek M. A pragmatic introduction to secure multi-party computation // Foundations and Trends in Privacy and Security. 2018. V. 2. N 2-3. P. 70–246. http://dx.doi.org/10.1561/3300000019
2. Falzon F., Markatou E.A. Re-visiting Authorized Private Set Intersection: a new privacy-preserving variant and two protocols // Proceedings on Privacy Enhancing Technologies. 2025. V. 1. P. 792–807. https://doi.org/10.56553/popets-2025-0041
3. Sun Z. Efficient multiparty private set intersection protocol based on function secret sharing // Proceedings of SPIE. 2024. V. 13175. P. 1317505. https://doi.org/10.1117/12.3031902
4. Debnath S.K. Provably Secure Private Set Intersection With Constant Communication Complexity // International Journal of Cyber Warfare and Terrorism. 2019. V. 9. N 2. P. 39–64. https://doi.org/10.4018/IJCWT.2019040104
5. Ben-Efraim A., Nissenbaum O., Omri E., Paskin-Cherniavsky A. Psimple: Practical multiparty maliciously-secure private set intersection // Proc. of the ACM on Asia Conference on Computer and Communications Security. 2022. P. 1098–1112. https://doi.org/10.1145/3488932.3523254
6. Cheon J.H., Jarecki S., Seo J.H. Multi-party privacy-preserving set intersection with quasi-linear complexity // IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences. 2012. V. E95.A. N 8. P. 1366–1378. https://doi.org/10.1587/transfun.e95.a.1366
7. Bay A. New threshold private set intersection protocols // Mugla Journal of Science and Technology. 2024. V. 10. N 1. P. 51–60. https://doi.org/10.22531/muglajsci.1387499
8. Gao J., Trieu N., Yanai A. Multiparty private set intersection cardinality and its applications // Proceedings on Privacy Enhancing Technologies. 2024. V. 2024. N 2. P. 73–90. https://doi.org/10.56553/popets-2024-0041
9. Faber S. Variants of privacy preserving set intersection and their practical applications. Dissertation for the degree of PhD in Computer Science. Irvine, University of California, 2016. 192 p.
10. LiY., Jiang Z.L., Yao L., Wang X., Yiu S.M., Huang Z. Outsourced privacy-preserving C4.5 decision tree algorithm over horizontally and vertically partitioned dataset among multiple parties // Cluster Computing. 2019. V. 22. Suppl. 1. P. 1581–1593. https://doi.org/10.1007/s10586-017-1019-9
11. Shen L., Chen X., Wang D., Fang B., Dong Y. Efficient and private set intersection of human genomes // Proc. of the IEEE International Conference on Bioinformatics and Biomedicine (BIBM). 2018. P. 761–764. https://doi.org/10.1109/bibm.2018.8621291
12. Aziz M.M.A., Alhadidi D., Mohammed N. Secure approximation of edit distance on genomic data // BMC Medical Genomics. 2017. V. 10. P. 55–67. https://doi.org/10.1186/s12920-017-0279-9

References

1. Evans D., Kolesnikov V., Rosulek M. A pragmatic introduction to secure multi-party computation. *Foundations and Trends in Privacy and Security*, 2018, vol. 2, no. 2-3, pp. 70–246. http://dx.doi.org/10.1561/3300000019
2. Falzon F., Markatou E.A. Re-visiting Authorized Private Set Intersection: a new privacy-preserving variant and two protocols. *Proceedings on Privacy Enhancing Technologies*, 2025, vol. 1, pp. 792–807. https://doi.org/10.56553/popets-2025-0041
3. Sun Z. Efficient multiparty private set intersection protocol based on function secret sharing. *Proceedings of SPIE*, 2024, vol. 13175, pp. 1317505. https://doi.org/10.1117/12.3031902
4. Debnath S.K. Provably Secure Private Set Intersection With Constant Communication Complexity. *International Journal of Cyber Warfare and Terrorism*, 2019, vol. 9, no. 2, pp. 39–64. https://doi.org/10.4018/IJCWT.2019040104
5. Ben-Efraim A., Nissenbaum O., Omri E., Paskin-Cherniavsky A. Psimple: Practical multiparty maliciously-secure private set intersection. *Proc. of the ACM on Asia Conference on Computer and Communications Security*, 2022, pp. 1098–1112. https://doi.org/10.1145/3488932.3523254
6. Cheon J.H., Jarecki S., Seo J.H. Multi-party privacy-preserving set intersection with quasi-linear complexity. *IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences*, 2012, vol. E95.A, no. 8, pp. 1366–1378. https://doi.org/10.1587/transfun.e95.a.1366
7. Bay A. New threshold private set intersection protocols. *Mugla Journal of Science and Technology*, 2024, vol. 10, no. 1, pp. 51–60. https://doi.org/10.22531/muglajsci.1387499
8. Gao J., Trieu N., Yanai A. Multiparty private set intersection cardinality and its applications. *Proceedings on Privacy Enhancing Technologies*, 2024, vol. 2024, no. 2, pp. 73–90. https://doi.org/10.56553/popets-2024-0041
9. Faber S. Variants of privacy preserving set intersection and their practical applications. *Dissertation for the degree of PhD in Computer Science*. Irvine, University of California, 2016, 192 p.
10. LiY., Jiang Z.L., Yao L., Wang X., Yiu S.M., Huang Z. Outsourced privacy-preserving C4.5 decision tree algorithm over horizontally and vertically partitioned dataset among multiple parties. *Cluster Computing*, 2019, vol. 22, suppl. 1, pp. 1581–1593. https://doi.org/10.1007/s10586-017-1019-9
11. Shen L., Chen X., Wang D., Fang B., Dong Y. Efficient and private set intersection of human genomes. *Proc. of the IEEE International Conference on Bioinformatics and Biomedicine* (BIBM), 2018, pp. 761–764. https://doi.org/10.1109/bibm.2018.8621291
12. Aziz M.M.A., Alhadidi D., Mohammed N. Secure approximation of edit distance on genomic data. *BMC Medical Genomics*, 2017, vol. 10, pp. 55–67. https://doi.org/10.1186/s12920-017-0279-9

13. Hasan H.A., Al-Layla H.F., Ibraheem F.N. A review of hash function types and their applications // Wasit Journal of Computer and Mathematics Science. 2022. V. 1. N 3. P. 75–88. https://doi.org/10.31185/wjcm.52
14. Casacuberta S., Hesse J., Lehmann A. SoK: oblivious pseudorandom functions // Proc. of the IEEE 7th European Symposium on Security and Privacy (EuroS&P). 2022. P. 625–646. https://doi.org/10.1109/eurosp53844.2022.00045
15. Bay A., Kayan A. A new multi-party private set intersection protocol based on OPRFs // Mugla Journal of Science and Technology. 2022. V. 8. N 1. P. 69–75. https://doi.org/10.22531/muglajsci.1075788
16. Chase M., Miao P. Private set intersection in the internet setting from lightweight oblivious PRF // Lecture Notes in Computer Science. 2020. V. 12172. P. 34–63. https://doi.org/10.1007/978-3-030-56877-1_2
17. Kavousi A., Mohajeri J., Salmasizadeh M. Efficient scalable multi-party private set intersection using oblivious PRF // Lecture Notes in Computer Science. 2021. V. 13075. P. 81–99. https://doi.org/10.1007/978-3-030-91859-0_5
18. Pinkas B., Schneider T., Zohner M. Faster private set intersection based on OT extension // Proc. of the 23rd Usenix Security Symposium. 2014. P. 797–812.
19. Tang Y., Guo M., Huo Y., Zhao Z., Yu J., Qin B. An MLWE-based cut-and-choose oblivious transfer protocol // Entropy. 2024. V. 26. N 9. P. 793. https://doi.org/10.3390/e26090793
20. Kolesnikov V., Matania N., Pinkas B., Rosulek M., Trieu N. Practical multi-party private set intersection from symmetric-key techniques // Proc. of the ACM SIGSAC Conference on Computer and Communications Security. 2017. P. 1257–1272. https://doi.org/10.1145/3133956.3134065

13. Hasan H.A., Al-Layla H.F., Ibraheem F.N. A review of hash function types and their applications. *Wasit Journal of Computer and Mathematics Science*, 2022, vol. 1, no. 3, pp. 75–88. https://doi.org/10.31185/wjcm.52
14. Casacuberta S., Hesse J., Lehmann A. SoK: oblivious pseudorandom functions. *Proc. of the IEEE 7th European Symposium on Security and Privacy* (EuroS&P), 2022, pp. 625–646. https://doi.org/10.1109/eurosp53844.2022.00045
15. Bay A., Kayan A. A new multi-party private set intersection protocol based on OPRFs. *Mugla Journal of Science and Technology*, 2022, vol. 8, no. 1, pp. 69–75. https://doi.org/10.22531/muglajsci.1075788
16. Chase M., Miao P. Private set intersection in the internet setting from lightweight oblivious PRF. *Lecture Notes in Computer Science*, 2020, vol. 12172, pp. 34–63. https://doi.org/10.1007/978-3-030-56877-1_2
17. Kavousi A., Mohajeri J., Salmasizadeh M. Efficient scalable multi-party private set intersection using oblivious PRF. *Lecture Notes in Computer Science*, 2021, vol. 13075, pp. 81–99. https://doi.org/10.1007/978-3-030-91859-0_5
18. Pinkas B., Schneider T., Zohner M. Faster private set intersection based on OT extension. *Proc. of the 23rd Usenix Security Symposium*, 2014, pp. 797–812.
19. Tang Y., Guo M., Huo Y., Zhao Z., Yu J., Qin B. An MLWE-based cut-and-choose oblivious transfer protocol. *Entropy*, 2024, vol. 26, no. 9, pp. 793. https://doi.org/10.3390/e26090793
20. Kolesnikov V., Matania N., Pinkas B., Rosulek M., Trieu N. Practical multi-party private set intersection from symmetric-key techniques. *Proc. of the ACM SIGSAC Conference on Computer and Communications Security*, 2017, pp. 1257–1272. https://doi.org/10.1145/3133956.3134065

Автор

Иогансон Иван Дмитриевич — аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, SC 57883504800, https://orcid.org/0000-0002-0856-2249, ivan.ioganson@yandex.ru

Author

Ivan D. Ioganson — PhD Student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, SC 57883504800, https://orcid.org/0000-0002-0856-2249, ivan.ioganson@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 06.02.2025
Одобрена после рецензирования 04.06.2025
Принята к печати 17.07.2025

Received 06.02.2025
Approved after reviewing 04.06.2025
Accepted 17.07.2025

Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ
июль–август 2025 Том 25 № 4 http://ntv.ifmo.ru/
SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL OF INFORMATION TECHNOLOGIES, MECHANICS AND OPTICS
Jule–August 2025 Vol. 25 No 4 http://ntv.ifmo.ru/en/
ISSN 2226-1494 (print) ISSN 2500-0373 (online)

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ

doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-4-710-717
УДК 004.89

K-sparse энкодер для эффективного информационного поиска

Вячеслав Юрьевич Добрынин✉

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация
vidobrynin@itmo.ru✉, https://orcid.org/0009-0004-3056-8403

Аннотация

Введение. Современные промышленные поисковые системы, как правило, используют двухстадийный конвейер — быстрый отбор кандидатов и последующее ранжирование, что неизбежно ведет к потере части релевантных документов из-за простых алгоритмов на первой стадии. В работе предлагается одностадийный подход, сочетающий преимущества плотных моделей семантического поиска и эффективности инвертированных индексов. Ключевым компонентом решения является K-sparse энкодер, применяемый для преобразования плотных векторов в разреженные, совместимые с инвертированными индексами библиотеки Lucene. **Метод.** В отличие от ранее исследованного идентифицируемого вариационного автоэнкодера, предлагаемая модель основана на автоэнкодере с функцией активации TopK, которая явно фиксирует число ненулевых координат на этапе обучения. Такая функция активации делает процесс получения разреженного вектора дифференцируемым, устраняет необходимость постобработки и упрощает функцию потерь до суммы ошибки восстановления и компоненты, сохраняющей относительные расстояния между плотными и разреженными представлениями. Обучение выполнялось на подмножестве из 300 тыс. документов набора данных MS MARCO с использованием PyTorch и GPU NVIDIA L4. **Основные результаты.** Предложенная модель достигает 96,6 % качества исходной плотной модели по метрике NDCG@10 (0,57 против 0,59) на наборе данных SciFact при 80 % разреженности векторов. Дополнительно показано, что дальнейшее увеличение разреженности снижает объем индекса и ускоряет время поиска, сохраняя приемлемое качество поиска. По используемой памяти решение превосходит графовый алгоритм Hierarchical Navigable Small World, а по скорости приближается к нему при высоких уровнях разреженности. **Обсуждение.** Работа подтверждает применимость предложенного подхода для поиска неструктурированных данных. Прямое управление степенью разреженности дает возможность балансировать между качеством, задержкой поиска и требованиями к памяти. Благодаря использованию инвертированного индекса на базе библиотеки Lucene, предлагаемое решение может быть эффективно применено в промышленных поисковых системах. В качестве направлений дальнейших исследований рассматриваются интерпретируемость извлекаемых признаков и повышение качества поиска при значительной разреженности представлений.

Ключевые слова

информационный поиск, разреженные векторные представления, K-sparse автоэнкодер, функция активации TopK, инвертированный индекс, одностадийная архитектура

Ссылка для цитирования: Добрынин В.Ю. K-sparse энкодер для эффективного информационного поиска // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2025. Т. 25, № 4. С. 710–717. doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-4-710-717

K-sparse encoder for efficient information retrieval

Viacheslav Yu. Dobrynin✉

ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation
vidobrynin@itmo.ru✉, https://orcid.org/0009-0004-3056-8403

Abstract

Modern industrial search engines typically employ a two-stage pipeline: fast candidate retrieval followed by reranking. This approach inevitably leads to the loss of some relevant documents due to the simplicity of algorithms used in the first stage. This work proposes a single-stage approach that combines the advantages of dense semantic search models with the efficiency of inverted indices. The key component of the solution is a K-sparse encoder used to convert dense

© Добрынин В.Ю., 2025

vectors into sparse ones compatible with inverted indices of the Lucene library. In contrast to the previously studied identifiable variational autoencoder, the proposed model is based on an autoencoder with a TopK activation function which explicitly enforces a fixed number of non-zero coordinates during training. This activation function makes the sparse vector generation process differentiable, eliminates the need for post-processing, and simplifies the loss function to a sum of reconstruction error and a component preserving relative distances between dense and sparse representations. The model was trained on a 300,000-document subset of the MS MARCO dataset using PyTorch and an NVIDIA L4 GPU. The proposed model achieves 96.6 % of the quality of the original dense model in terms of the NDCG@10 metric (0.57 vs. 0.59) on the SciFact dataset with 80 % sparsity. It is also shown that further increasing sparsity reduces index size and improves retrieval speed while maintaining acceptable search quality. In terms of memory usage, the approach outperforms the Hierarchical Navigable Small World (HNSW) graph-based algorithm, and at high sparsity levels, its speed approaches that of HNSW. The results confirm the applicability of the proposed approach to unstructured data retrieval. Direct control over sparsity enables balancing between search quality, latency, and memory requirements. Thanks to the use of an inverted index based on the Lucene library, the proposed solution is well suited for industrial-scale search systems. Future research directions include interpretability of the extracted features and improving retrieval quality under high sparsity conditions.

Keywords
information retrieval, sparse vector representations, autoencoder, TopK activation function, inverted index, single-stage architecture

For citation: Dobrynin V.Yu. K-sparse encoder for efficient information retrieval. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2025, vol. 25, no. 4, pp. 710–717 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-4-710-717

Введение

Архитектура современных промышленных поисковых систем состоит из двух стадий [1, 2]: быстрое извлечение документов-кандидатов и ранжирование полученного списка. Хотя данный подход сочетает скорость и качество каждого из этапов, первый этап фундаментально ограничивает его, поскольку теряет релевантные документы из-за своей простоты [3, 4]. Решить данную проблему позволяет переход к одностадийной архитектуре. Впервые подобный подход был продемонстрирован в моделях Standalone Neural Ranking Model [5], Sparse Lexical and Expansion Model [6] и других. Также следует отметить, что подобные решения были представлены в работах [7, 8].

В настоящей работе продолжены исследования алгоритма, предложенного в [7]. Основная идея заключается в использовании энкодера, который конвертирует плотные векторные представления в разреженные. Эти разреженные представления можно использовать с инвертированным индексом, обеспечивающим высокую эффективность поиска. Требуемый энкодер получается в ходе обучения автоэнкодера, состоящего из энкодера и декодера.

В работе [7] была выдвинута гипотеза о том, что для разреженного пространства необходимы ограничения согласованности, независимости, разреженности, а также сохранения относительных расстояний между плотными и разреженными представлениями. Однако эксперименты показали, что ключевую роль для качества поиска играла функция потерь, отвечающая за сохранение относительных расстояний.

Ввиду выявленных ограничений предлагается усовершенствованная архитектура модели, позволяющая учесть недостатки ранее предложенного подхода.

Ограничения предложенной модели

В основе архитектуры лежит модель, предложенная в работе [7], в которой использовался идентифицируемый вариационный автоэнкодер (Identifiable Variational Autoencoder, iVAE) [9], предназначенный для ввода ограничения независимости на получаемое скрытое пространство. Однако вариационная природа данной модели имеет существенное ограничение — энкодер генерирует параметры нормального распределения, из которого сэмплируются конкретные значения разреженного вектора. Данная особенность приводит к тому, что в результирующем векторе отсутствуют значения, равные нулю, а присутствуют лишь близкие к нему. Это вынуждает использовать механизм зануления значений, близких к нулю. Так, в работе [7] использовался определенный перцентиль наибольших значений по модулю. Однако такое зануление приводит к потере информации, поскольку во время обучения автоэнкодер не учитывает этот процесс, что создает несоответствие между обучением и использованием модели. Включить такое зануление в процесс обучения невозможно, поскольку без дополнительных модификаций эта операция не является дифференцируемой [10].

Для обучения модели использовалась следующая общая функция потерь:

$$L = \alpha_1 L_{ELBO} + \alpha_2 L_{dist} + \alpha_3 L_{FLOPS}, \quad (1)$$

где L_{ELBO} — вариационная нижняя граница (Evidence Lower Bound, ELBO), необходимая как для обеспечения независимости координат скрытого пространства, так и для восстановления входных данных автоэнкодера; L_{dist} — функция потерь (distance loss, dist), сохраняющая относительные расстояния между плотными и разреженными векторами; L_{FLOPS} — функция потерь (Floating-Point Operations, FLOPS), необходимая для получения разреженного вектора; α_1, α_2 и α_3 — коэффициенты, регулирующие вклад каждой из компонент. Подробное описание функции потерь представлено в работе [7].

Подбор значений коэффициентов функции потерь (1) осуществлялся эмпирически, и влияние их выбора показано на рис. 1.

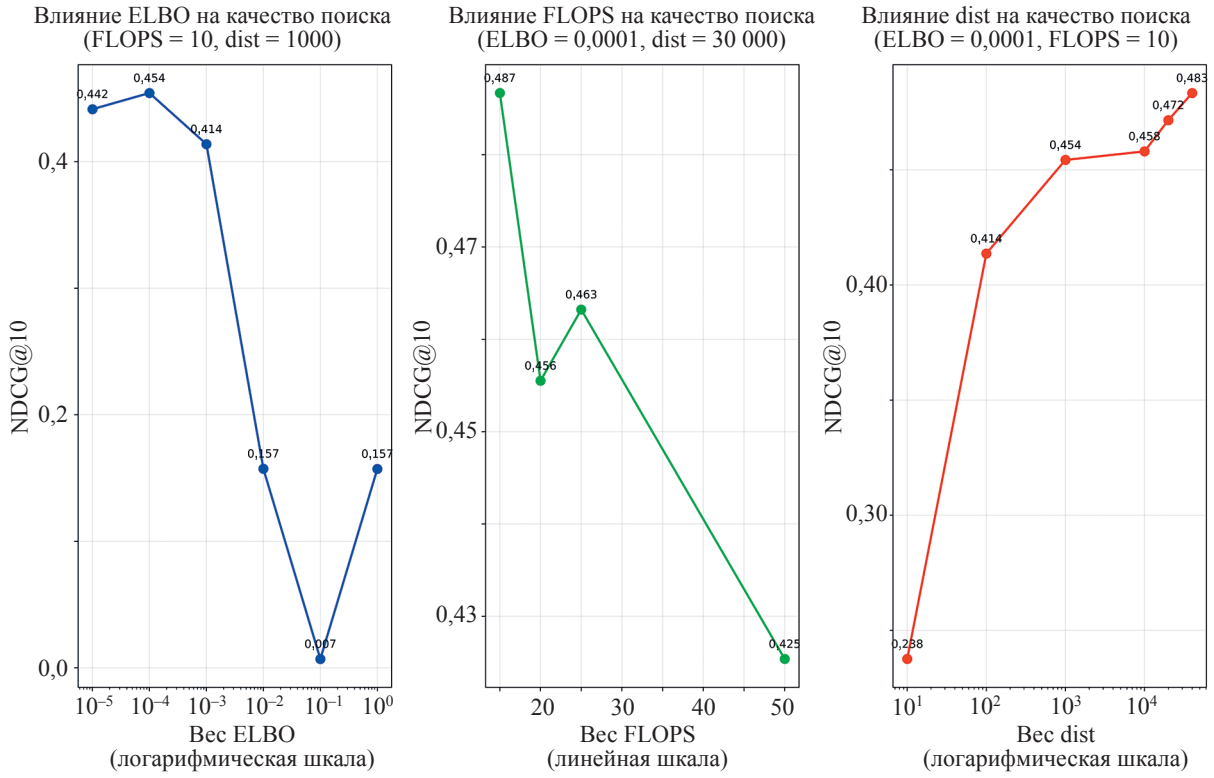


Рис. 1. Влияние компонентов функции потерь на качество поиска по метрике Normalized Discounted Cumulative Gain (NDCG)

Fig. 1. Impact of loss function components on search quality measured by Normalized Discounted Cumulative Gain (NDCG)

Таким образом, проведенные исследования показали, что качество поиска существенно растет при увеличении вклада функции потерь, отвечающей за сохранение относительных расстояний между плотными и разреженными векторами. В то же время наблюдается снижение качества при увеличении вклада нижней вариационной границы, используемой в iVAE для обучения автоэнкодера.

Предлагаемые изменения

Вместо энкодера iVAE в текущей работе предлагается использовать K-sparse энкодер [11] с применением специальной функции активации TopK (рис. 2). Функция TopK позволяет явно ограничить количество ненулевых компонент в скрытом пространстве, при этом все еще поддерживает использование градиентного спуска для оптимизации, что является критически важным свойством.

В работе [12] исследователи из компании OpenAI используют K-sparse энкодер для интерпретации нейронов больших языковых моделей.

В настоящей работе предлагается адаптировать данный энкодер для задачи извлечения интерпретируемых компонент из плотного вектора **x** с целью их дальнейшего использования с инвертированным индексом в системах информационного поиска.

Таким образом, вместо iVAE будет обучаться обычный автоэнкодер с функцией потерь Mean Square Error. Это позволит существенно упростить модель и пол-

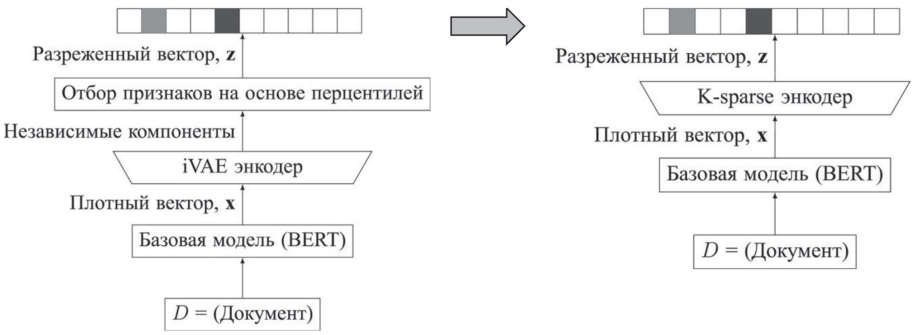


Рис. 2. Упрощение процесса разреживания плотного вектора модели Bidirectional Encoder Representations from Transformers (BERT)

Fig. 2. Simplification of the dense vector sparsification process for the Bidirectional Encoder Representations from Transformers (BERT) model

ностью устранить необходимость в блоке зануления компонент, близких к нулю, так как функция TopK уже обеспечивает требуемую разреженность.

Важным компонентом новой архитектуры модели является функция потерь, предложенная в работе [7], которая отвечает за сохранение относительных расстояний между плотными и разреженными векторами:

$$L_{dist} = \frac{1}{N}\left|\left|\text{diag}(\mathbf{X}\mathbf{X}^T)^{-1}\mathbf{X}\mathbf{X}^T - \text{diag}(\mathbf{Z}\mathbf{Z}^T)^{-1}\mathbf{Z}\mathbf{Z}^T\right|\right|_F, \quad (2)$$

где N — размер пакета (батча); $\mathbf{X}$ и $\mathbf{Z}$ — пакеты плотных и разреженных векторных представлений; diag($\mathbf{M}$) — диагональная матрица из диагональных элементов матрицы $\mathbf{M}$; $\left|\left|.\right|\right|_F$ — норма Фробениуса.

Это особенно критично, поскольку именно порядок ранжирования документов является ключевым свойством в задаче информационного поиска, для которой будут использоваться полученные разреженные представления.

Результирующая функция потерь имеет следующий вид:

$$L = \alpha_1 L_{MSE} + \alpha_2 L_{dist}. \quad (3)$$

Применение функции потерь (3) в процессе обучения представлено на рис. 3.

Предложенные изменения позволяют обучать энкодер, который изначально формирует представление с фиксированным числом ненулевых компонент, устраняя необходимость в последующем занулении.

Независимость координат разреженного пространства

В данной работе явно не накладывается ограничение на независимость в скрытом пространстве. Однако это не означает, что такое ограничение не является полезным. Компоненты плотных векторных представлений могут одновременно отражать несколько концептов — аналогично нейронам в больших языковых моделях, активирующимся в различных контекстах. Тем не менее, как показано в работе исследователей из компании Anthropic [13], использование разреженных автоэнкодеров с избыточной размерностью скрытого пространства (overcomplete) позволяет «распутать» нейроны или компоненты плотного вектора до более однозначных интерпретаций. Это свойство является желательным при построении поиска на основе инвертированного индекса.

Экспериментальное исследование

Модель обучалась с использованием языка программирования Python и фреймворка машинного обучения PyTorch [14]. Обучение выполнялось на графическом ускорителе NVIDIA L4 с 23 ГБ видеопамяти.

В качестве набора данных для обучения применено подмножество из 300 тыс. документов коллекции MS MARCO [15]. Для оперативной проверки качества в процессе разработки использовался сравнительно небольшой набор данных SciFact [16].

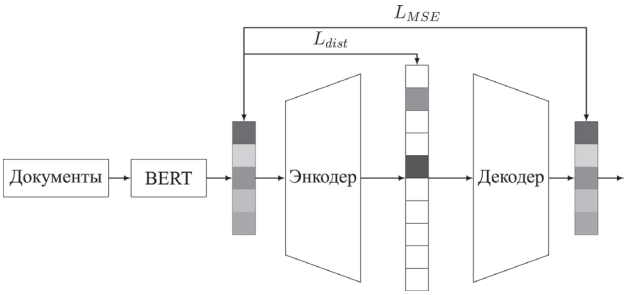


Рис. 3. Схема обучения K-sparse автоэнкодера

Fig. 3. Training scheme of the K-sparse autoencoder

Параметры эксперимента:

— базовая модель для генерации плотных векторных представлений: sentence-transformers/msmarco-distilbert-dot-v5;
— размер плотного вектора: 768;
— размер разреженного вектора: 3000;
— количество ненулевых компонент для функции TopK: 600 (что соответствует уровню разреженности 80 % — такому же, как и в версии алгоритма [7]).

Важно отметить, что основная задача заключается в разреживании векторных представлений с минимальной потерей качества поиска по сравнению с исходной плотной моделью. Идеальным результатом было бы максимальное приближение к качеству поиска оригинальной плотной модели, но с преимуществами разреженных представлений в скорости и эффективности поиска благодаря применения инвертированного индекса.

Результаты оценки качества представлены в табл. 1.

Анализ результатов показывает, что предложенная новая версия алгоритма с K-sparse энкодером демонстрирует лучшее качество поиска (0,57 против 0,51 по метрике NDCG@10), приближаясь к 96,6 % от качества исходной плотной модели.

Основными факторами улучшения являются: упрощение архитектуры модели благодаря замене iVAE на обычный автоэнкодер; устранение необходимости постобработки с занулением значений, близких к нулю; явное ограничение разреженности с помощью функции активации TopK.

Выполнен анализ влияния уровня разреженности на качество поиска. В табл. 2 представлены значения метрики NDCG@10 в зависимости от k — количества ненулевых компонент разреженного вектора.

Результаты показывают, что увеличение уровня разреженности приводит к снижению качества поиска. Наиболее значительная потеря качества наблюдается при увеличении уровня разреженности с 93 % до 97 %. С другой стороны, повышение разреженности приводит к снижению требований к памяти за счет хранения меньшего числа ненулевых компонент, а также к ускорению поиска, поскольку при уменьшении числа термов в запросе инвертированные индексы работают быстрее. Таким образом, выбор уровня разреженности представляет собой компромисс между качеством и ресурсоемкостью поиска.

Таблица 1. Значения NDCG@10 для разных версий предложенного метода и эмбеддинг модели
Table 1. NDCG@10 scores for different versions of the proposed method and the embedding model

Алгоритм	NDCG@10	Относительное качество, %
Алгоритм, предложенный в работе [7] (с iVAE)	0,51	86,4
Алгоритм, предложенный в настоящей работе (с K-sparse)	0,57	96,6
Эмбеддинг модель	0,59	100

Таблица 2. Значения NDCG@10 при различном уровне разреженности вектора
Table 2. NDCG@10 values at different sparsity levels of the vector

k	Уровень разреженности, %	NDCG@10
100	97	0,41
200	93	0,50
300	90	0,53
400	87	0,54
500	83	0,56
600	80	0,57

Таблица 3. Значения NDCG@10 при различных коэффициентах функции потерь
Table 3. NDCG@10 values for different loss function coefficient settings

α_1	α_2	NDCG@10
0	1	0,5720
1	0	0,0062
0,5	1	0,5606
1	0,5	0,5694
1	1	0,5696

Исследовано влияние компонентов функции потерь, которое регулируется с помощью коэффициентов формулы (3) (табл. 3).

Полученные значения NDCG@10 показывают, что основное влияние на качество поиска оказывает предложенная функция потерь (2), направленная на сохранение относительных расстояний. Данный результат ожидаем, поскольку в задаче ранжирования относительный порядок документов является ключевым фактором, используемым при обучении моделей ранжирования. Однако важно отметить, что включение ошибки восстановления в общую функцию потерь не приводит к значительным потерям качества, но может быть полезным при интерпретации координат разреженного пространства за счет сохранения семантической составляющей векторов. Однако этот аспект не рассматривается в рамках данной работы и является предметом дальнейших исследований.

Все остальные эксперименты в работе выполнялись с коэффициентами $\alpha_1 = \alpha_2 = 1$.

Для оценки эффективности предложенного алгоритма в качестве базового алгоритма для сравнения был выбран графовый Hierarchical Navigable Small World (HNSW) [17], являющийся одной из самых эффективных реализаций алгоритмов приближенного векторного поиска. Благодаря высокой скорости и качеству поиска, HNSW используется в качестве алгоритма по умолчанию во многих современных векторных базах данных. Его преимущество заключается в использовании внутренней графовой структуры, обеспечивающей высокую производительность при сохранении точности. Однако существенным недостатком HNSW являются высокие требования к объему памяти, необходимой для хранения этой структуры. Предложенный алгоритм реализован с использованием библиотеки Lucene, которая является стандартом в области полнотекстового поиска, а также с применением модуля PyLucene, поскольку реализация выполнена на языке программирования Python. Для обеспечения корректного сравнения реализация HNSW также использовалась в рамках библиотеки Lucene. Это важно, так как в обоих случаях учитываются накладные расходы, связанные с вызовами из Python в Java, а также работа Java Virtual Machine, включая JIT-компиляцию (JIT — just-in-time). Для оценки эффективности были применены подмножества набора данных MS MARCO. При измерении времени выполнения учитывались как этап кодирования запроса в векторное представление, так и последующий поиск по индексу. Эксперименты проводились на персональном компьютере с процессором Intel Core i7-11850H, графическим процессором NVIDIA RTX A4000 Mobile и 32 ГБ оперативной памяти. Сравнение охватывает следующие метрики: объем используемой дисковой памяти, время выполнения запросов и качество поиска на подмножестве набора данных. Результаты приведены в табл. 4.

Из результатов сравнения видно, что предложенный алгоритм во всех вариантах превосходит HNSW по используемой памяти, но уступает по времени выполнения. Однако при увеличении разреженности время выполнения приближается к показателям HNSW, при этом затраты на память значительно снижаются. Однако, это негативно сказывается на качестве поиска.

Обсуждение

В результате экспериментального исследования было показано, что предложенная модель позволяет снизить ресурсоемкость векторного поиска при сохранении высокого качества результатов.

Установлено, что при увеличении разреженности векторов существенно снижаются требования к памяти, а производительность поиска приближается к уровню

Таблица 4. Сравнение предложенного алгоритма и HNSW на подмножествах набора данных MS MARCO
Table 4. Comparison of the proposed algorithm and HNSW on subsets of the MS MARCO dataset

Количество документов в подмножестве	Предложенный алгоритм			HNSW
	$k = 100$	$k = 200$	$k = 600$	
Объем используемой дисковой памяти, МБ				
25 000	13	25	60	75
50 000	24	43	113	149
100 000	46	85	224	298
Время выполнения запроса, мс				
25 000	37,3	57,5	225,8	30,6
50 000	48,1	97,0	366,5	33,6
100 000	58,0	128,1	755,6	38,0
Качество поиска, NDCG@10				
25 000	0,2268	0,2451	0,2535	0,2410
50 000	0,2183	0,2973	0,3404	0,3513
100 000	0,2887	0,3485	0,3616	0,3710

высокоэффективного алгоритма HNSW. Замедление работы при более высоком уровне разреженности объясняется необходимостью перебора большего числа постинг-листов, соответствующих термам запроса. Дополнительным фактором замедления является использование энкодера, обеспечивающего разреживание — в отличие от исходной модели, не имеющей аналогичного компонента, он вносит дополнительную вычислительную нагрузку.

Показано, что коэффициент разреженности представляет собой компромисс между качеством поиска и его скоростью. Таким образом, в задачах, где приоритет отдается точности, целесообразно использовать менее разреженные векторы, тогда как в сценариях, критичных к времени отклика, — более разреженные. При этом на всем диапазоне исследованных коэффициентов разреженности предложенный алгоритм демонстрирует существенно более низкие требования к объему памяти по сравнению с HNSW, что особенно важно при работе с большими объемами данных. Кроме того, использование инвертированного индекса — отраслевого стандарта в системах полнотекстового поиска — обеспечивает предложенному методу потенциал к лучшему масштабированию в сравнении с HNSW.

Тем не менее важным направлением дальнейшей работы остается повышение выразительности векторных представлений при высокой степени разреженности, что может позволить улучшить качество поиска без потери производительности.

Заключение

В рамках данного исследования разработана и экспериментально проверена усовершенствованная версия алгоритма разреживания плотных векторных представлений для задач информационного поиска. Ключевым архитектурным изменением стало использование K-sparse автоэнкодера вместо идентифицируемого вариационного автоэнкодера.

Такой подход позволил устранить необходимость постобработки векторов путем зануления. Уменьшена сложность модели при сохранении ее эффективности. Появилась возможность напрямую контролировать уровень разреженности получаемых представлений.

В результате проведенных экспериментов было достигнуто улучшение качества поиска по сравнению с предыдущей версией модели для метрики NDCG@10 с 0,51 до 0,57, что соответствует 96,6 % от качества оригинальной плотной модели. Это существенно приближает разреженное представление к качеству плотного при $k = 600$, при этом сохраняя преимущества разреженных векторов в виде возможности использования с инвертированным индексом для высокоэффективного поиска.

Экспериментальная оценка показала, что K-sparse индексы занимают значительно меньше памяти, чем HNSW, при умеренной потере скорости и незначительном падении качества.

Полученные результаты подтверждают перспективность перехода от двухстадийной архитектуры поисковых систем к одностадийной с использованием полученных разреженных представлений, способных обеспечить как низкие требования к ресурсам, так и качество поиска.

В дальнейших исследованиях планируется углубленная работа по интерпретации полученного разреженного векторного представления, изучение способов повышения выразительности векторных представлений с большим коэффициентом разреженности, масштабирование обучения на больших наборах данных.

Литература

1. Chen R., Gallagher L., Blanco R., Culpepper J.S. Efficient cost-aware cascade ranking in multi-stage retrieval // Proc. of the 40th International ACM SIGIR Conference on Research and Development in Information Retrieval. 2017. P. 445–454. https://doi.org/10.1145/3077136.3080819
2. Liu S., Xiao F., Ou W., Si L. Cascade ranking for operational E-commerce search // Proc. of the 23rd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. 2017. P. 1557–1565. https://doi.org/10.1145/3097983.3098011
3. Furnas G.W., Landauer T.K., Gomez L.M., Dumais S.T. The vocabulary problem in human-system communication // Communications of the ACM. 1987. V. 30. N 11. P. 964–971. https://doi.org/10.1145/32206.32212
4. Zhao L., Callan J. Term necessity prediction // Proc. of the 19th ACM International Conference on Information and Knowledge Management. 2010. P. 259–268. https://doi.org/10.1145/1871437.1871474
5. Zamani H., Dehghani M., Croft W.B., Learned-Miller E., Kamps J. From neural re-ranking to neural ranking: Learning a sparse representation for inverted indexing // Proc. of the 27th ACM International Conference on Information and Knowledge Management. 2018. P. 497–506. https://doi.org/10.1145/3269206.3271800
6. Formal T., Piwowarski B., Clinchant S. SPLADE: Sparse lexical and expansion model for first stage ranking // Proc. of the 44th International ACM SIGIR Conference on Research and Development in Information Retrieval. 2021. P. 2288–2292. https://doi.org/10.1145/3404835.3463098
7. Dobrynin V., Sherman M., Abramovich R., Platonov A. A sparsifier model for efficient information retrieval // IEEE 18th International Conference on Application of Information and Communication Technologies (AICT). 2024. P. 1–4. https://doi.org/10.1109/aict61888.2024.10740301
8. Dobrynin V.Yu., Abramovich R.K., Platonov A.V. Efficient sparse retrieval through embedding-based inverted index construction // Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics. 2025. V. 25. N 1. P. 61–67. https://doi.org/10.17586/2226-1494-2025-25-1-61-67
9. Khemakhem I., Kingma D.P., Monti R.P., Hyvarinen A. Variational autoencoders and nonlinear ICA: A unifying framework // Proc. of the 23rd International Conference on Artificial Intelligence and Statistics (AISTATS). 2020. V. 108. P. 2207–2216.
10. Louizos C., Welling M., Kingma D.P. Learning sparse neural networks through L0 regularization // arXiv. 2017. arXiv:1712.01312. https://doi.org/10.48550/arXiv.1712.01312
11. Makhzani A., Frey B. k-Sparse autoencoders // arXiv. 2013. arXiv:1312.5663. https://doi.org/10.48550/arXiv.1312.5663
12. Gao L., Tour T.D., Tillman H., Goh G., Troll R., Radford A., Sutskever I., Leike J., Wu J. Scaling and evaluating sparse autoencoders // arXiv. 2024. arXiv:2406.04093. https://doi.org/10.48550/arXiv.2406.04093
13. Bricken T., Templeton A., Batson J., Chen B., Jermyn A., Conerly T., et al. Towards monosemanticity: decomposing language models with dictionary learning // Transformer Circuits Thread. 2023.
14. Paszke A., Gross S., Massa F., Lerer A., Bradbury J., Chanan G., et al. PyTorch: An imperative style, high-performance deep learning library // arXiv. 2019. arXiv:1912.01703. https://doi.org/10.48550/arXiv.1912.01703
15. Bajaj P., Campos D., Craswell N., Deng L., Gao J., Liu X., et al. MS MARCO: A human generated MAchine Reading COmprehension dataset // arXiv. 2016. arXiv:1611.09268. https://doi.org/10.48550/arXiv.1611.09268
16. Wadden D., Lin S., Lo K., Wang L.L., van Zuylen M., Cohan A., Hajishirzi H. Fact or fiction: verifying scientific claims // Proc. of the Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing (EMNLP). 2020. P. 7534–7550. https://doi.org/10.18653/v1/2020.emnlp-main.609
17. Malkov Y., Yashunin D.A. Efficient and robust approximate nearest neighbor search using hierarchical navigable small world graphs // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2020. V. 42. N 4. P. 824–836. https://doi.org/10.1109/TPAMI.2018.2889473

References

1. Chen R., Gallagher L., Blanco R., Culpepper J.S. Efficient cost-aware cascade ranking in multi-stage retrieval. *Proc. of the 40th International ACM SIGIR Conference on Research and Development in Information Retrieval*, 2017, pp. 445–454. https://doi.org/10.1145/3077136.3080819
2. Liu S., Xiao F., Ou W., Si L. Cascade ranking for operational E-commerce search. *Proc. of the 23rd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, 2017, pp. 1557–1565. https://doi.org/10.1145/3097983.3098011
3. Furnas G.W., Landauer T.K., Gomez L.M., Dumais S.T. The vocabulary problem in human-system communication. *Communications of the ACM*, 1987, vol. 30, no. 11, pp. 964–971. https://doi.org/10.1145/32206.32212
4. Zhao L., Callan J. Term necessity prediction. Proc. of the 19th ACM *International Conference on Information and Knowledge Management*, 2010, pp. 259–268. https://doi.org/10.1145/1871437.1871474
5. Zamani H., Dehghani M., Croft W.B., Learned-Miller E., Kamps J. From neural re-ranking to neural ranking: Learning a sparse representation for inverted indexing. *Proc. of the 27th ACM International Conference on Information and Knowledge Management*, 2018, pp. 497–506. https://doi.org/10.1145/3269206.3271800
6. Formal T., Piwowarski B., Clinchant S. SPLADE: Sparse lexical and expansion model for first stage ranking. *Proc. of the 44th International ACM SIGIR Conference on Research and Development in Information Retrieval*, 2021, pp. 2288–2292. https://doi.org/10.1145/3404835.3463098
7. Dobrynin V., Sherman M., Abramovich R., Platonov A. A sparsifier model for efficient information retrieval. *IEEE 18th International Conference on Application of Information and Communication Technologies (AICT)*, 2024, pp. 1–4. https://doi.org/10.1109/aict61888.2024.10740301
8. Dobrynin V.Yu., Abramovich R.K., Platonov A.V. Efficient sparse retrieval through embedding-based inverted index construction. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2025, vol. 25, no. 1, pp. 61–67. https://doi.org/10.17586/2226-1494-2025-25-1-61-67
9. Khemakhem I., Kingma D.P., Monti R.P., Hyvarinen A. Variational autoencoders and nonlinear ICA: A unifying framework. *Proc. of the 23rd International Conference on Artificial Intelligence and Statistics (AISTATS)*, 2020, vol. 108, pp. 2207–2216.
10. Louizos C., Welling M., Kingma D.P. Learning sparse neural networks through L0 regularization. *arXiv*, 2017, arXiv:1712.01312. https://doi.org/10.48550/arXiv.1712.01312
11. Makhzani A., Frey B. k-Sparse autoencoders. *arXiv*, 2013, arXiv:1312.5663. https://doi.org/10.48550/arXiv.1312.5663
12. Gao L., Tour T.D., Tillman H., Goh G., Troll R., Radford A., Sutskever I., Leike J., Wu J. Scaling and evaluating sparse autoencoders. *arXiv*, 2024, arXiv:2406.04093. https://doi.org/10.48550/arXiv.2406.04093
13. Bricken T., Templeton A., Batson J., Chen B., Jermyn A., Conerly T., et al. Towards monosemanticity: decomposing language models with dictionary learning. *Transformer Circuits Thread*, 2023.
14. Paszke A., Gross S., Massa F., Lerer A., Bradbury J., Chanan G., et al. PyTorch: An imperative style, high-performance deep learning library. *arXiv*, 2019, arXiv:1912.01703. https://doi.org/10.48550/arXiv.1912.01703
15. Bajaj P., Campos D., Craswell N., Deng L., Gao J., Liu X., et al. MS MARCO: A human generated MAchine Reading COmprehension dataset. *arXiv*, 2016, arXiv:1611.09268. https://doi.org/10.48550/arXiv.1611.09268
16. Wadden D., Lin S., Lo K., Wang L.L., van Zuylen M., Cohan A., Hajishirzi H. Fact or fiction: verifying scientific claims. *Proc. of the Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing (EMNLP)*, 2020, pp. 7534–7550. https://doi.org/10.18653/v1/2020.emnlp-main.609
17. Malkov Y., Yashunin D.A. Efficient and robust approximate nearest neighbor search using hierarchical navigable small world graphs. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2020, vol. 42, no. 4, pp. 824–836. https://doi.org/10.1109/TPAMI.2018.2889473

Автор

Добрынин Вячеслав Юрьевич — аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, SC 57223099701, https://orcid.org/0009-0004-3056-8403, vidobrynin@itmo.ru

Author

Viacheslav Yu. Dobrynin — PhD Student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, SC 57223099701, https://orcid.org/0009-0004-3056-8403, vidobrynin@itmo.ru

Статья поступила в редакцию 05.05.2025
Одобрена после рецензирования 10.06.2025
Принята к печати 20.07.2025

Received 05.05.2025
Approved after reviewing 10.06.2025
Accepted 20.07.2025

Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ
июль–август 2025 Том 25 № 4 http://ntv.ifmo.ru/
SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL OF INFORMATION TECHNOLOGIES, MECHANICS AND OPTICS
Jule–August 2025 Vol. 25 No 4 http://ntv.ifmo.ru/en/
ISSN 2226-1494 (print) ISSN 2500-0373 (online)

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ

doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-4-718-726
УДК 004.02

Метод сравнительного анализа временных серий наборов данных, заданных в виде множества строк, с использованием графов де Брейна

Артем Борисович Иванов[1]✉, Анатолий Абрамович Шалыто[2], Владимир Игоревич Ульянцев[3]

[1] Федеральный научно-клинический центр физико-химической медицины им. академика Ю. М. Лопухина Федерального медико-биологического агентства, Москва, 119435, Российская Федерация
[1,2,3] Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

[1] abivanov@itmo.ru✉, https://orcid.org/0000-0002-7997-0637
[2] anatoly.shalyto@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-2723-2077
[3] ulyantsev@itmo.ru, https://orcid.org/0000-0003-0802-830X

Аннотация

Введение. Рассмотрена задача сравнительного анализа временных серий образцов в наборах данных, заданных в виде множества строк. Предложен способ повышения точности определения различий между двумя образцами. На его основе разработан метод анализа временных серий из трех образцов, позволяющий повысить точность классификации изменений между образцами. Использование в анализе трех образцов обусловлено спецификой решаемой практической задачи обработки данных секвенирования метагеномных образцов, получение большего числа которых является очень ресурсоемким. **Методы.** Для классификации строк из одного образца на обнаруженные и необнаруженные строки в другом образце применяется метод сравнения двух образцов с использованием *k*-меров и графа де Брейна. В нем реализованы решающие правила, основывающиеся на статистиках частоты встречаемости *k*-меров, разных значениях параметра *k* и информации о возможных ошибках в строках. Для анализа временных серий из трех образцов (исходного и итогового образца для одного объекта и модифицирующего образца для другого объекта) разработан метод, на основе попарного сравнения образцов. Он применяется для разбиения строк каждого из образцов на группы в зависимости от обнаружения строк в других образцах. **Основные результаты.** Разработанный метод анализа временных серий протестирован на двух типах сгенерированных метагеномных данных, заданных в виде множества строк. Показано, что метод позволяет различать геномы организмов, имеющие отличия хотя бы в одном символе на каждые 10 000 символов. Показана высокая (больше 80 %) точность и полнота результатов классификации строк при анализе моделированных сложных данных большого объема, сопоставимых с реальными данными. **Обсуждение.** Предложенный метод позволяет сравнивать метагеномные образцы, заданные в виде множества строк, используя только сами данные и не требуя дополнительной информации. Это дает возможность осуществлять более точный анализ по сравнению с существующими методами, которые сравнивают образцы на основе результатов классификации строк в базах данных таксономической аннотации. Представленные методы могут найти применение в различных областях обработки строковых данных, например, для анализа изменений авторского стиля при написании серии текстов.

Ключевые слова

временные серии, граф де Брейна, *k*-меры, сравнительный анализ, классификация строк, метагеномные образцы

Ссылка для цитирования: Иванов А.Б., Шалыто А.А., Ульянцев В.И. Метод сравнительного анализа временных серий наборов данных, заданных в виде множества строк, с использованием графов де Брейна // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2025. Т. 25, № 4. С. 718–726. doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-4-718-726

© Иванов А.Б., Шалыто А.А., Ульянцев В.И., 2025

Comparative analysis method for time series data objects represented as sets of strings based on de Bruijn graphs

Artem B. Ivanov[1]✉, Anatoly A. Shalyto[2], Vladimir I. Ulyantsev[3]

[1] Lopukhin Federal Research and Clinical Center of Physical-Chemical Medicine of Federal Medical Biological Agency (FRCC PCM), Moscow, 119435, Russian Federation
[1,2,3] ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

[1] abivanov@itmo.ru✉, https://orcid.org/0000-0002-7997-0637
[2] anatoly.shalyto@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-2723-2077
[3] ulyantsev@itmo.ru, https://orcid.org/0000-0003-0802-830X

Abstract

The paper considers the comparative analysis of string datasets represented as time series of samples. We propose a method to increase the accuracy of determining differences between two samples. Based on this method, a method for analyzing time series of three samples has been developed, which allows for more accurate changes investigation between samples. The use of three samples in the analysis is due to the specific nature of the practical task of processing metagenomic sample sequencing data, obtaining a larger number of which is very resource-intensive. To classify strings from one sample into detected and undetected strings in another sample, a method of comparing two samples using *k*-mers and the de Bruijn graph is proposed. It implements decision rules based on statistics of the frequency of *k*-mers occurrence, different values of the parameter *k*, and information about possible errors in the strings. To analyze time series of three samples (the original and final sample for one object and the modifying sample for another object), a method based on pairwise comparison of samples is developed. It is used to divide the strings of each sample into groups depending on the detection of strings in other samples. The developed method for analyzing time series has been tested on two types of generated metagenomic data, represented as a set of strings. It was shown that the method allows distinguishing organisms that have differences in genomes in at least one symbol for every 10,000 symbols. High (more than 80 %) recall and precision of the results of string classification were demonstrated when analyzing simulated complex data, with properties comparable to real data. The developed method allows comparing metagenomic samples represented as a set of strings using only the data itself and without requiring additional information. This allows for a more accurate analysis compared to existing methods that compare samples based on the results of string classification in taxonomic annotation databases. The developed methods can also be used in other areas of string data processing such as analyzing changes in author style when writing a series of texts.

Keywords

time series, de Bruijn graph, *k*-mers, comparative analysis, strings classification, metagenomic samples

For citation: Ivanov A.B., Shalyto A.A., Ulyantsev V.I. Comparative analysis method for time series data objects represented as sets of strings based on de Bruijn graphs. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2025, vol. 25, no. 4, pp. 718–726 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-4-718-726

Введение

Информация может быть представлена в различных форматах: в текстовых данных, в виде изображений, аудио- и видеофайлов. Примерами текстовых данных являются литературные произведения, информация в статьях в сети Интернет и текстовые посты пользователей в социальных сетях. Такая информация сохраняется в виде наборов строк различной длины в алфавите, который содержит строчные и прописные буквы одного или нескольких языков, цифры и специальные символы. Несмотря на поддержку большого числа специальных символов в современных текстовых редакторах, многие тексты используют ограниченный набор символов. Кроме текстов общего назначения, формат строковых данных может использоваться в предметных областях для описания данных по определенным правилам. Например, в области вычислительной биологии данные о генетической информации, получаемой из организмов при помощи секвенирования, сохраняются в файлы в виде прочтений — строк небольшой длины (100–300 символов) в алфавите из четырех символов — нуклеотидов (A, C, G, T).

Наиболее часто в методах для анализа наборов данных, заданных множеством строк, первым этапом является извлечение из строк коротких признаков. Для этого текст разбивается на слова фиксированной длины — *n*-граммы [1]. Такие слова применяются для сравнения текстов [2], ранжирования документов в сети Интернет [3], исправления опечаток [4, 5] и обнаружения плагиата [6]. Однако интерпретация признаков в виде *n*-грамм — сложная задача, в связи с тем, что они являются короткими (как правило, от двух до 10 символов). Отдельные *n*-граммы не обладают смыслом с точки зрения естественного языка. Для получения осмысленных слов или словосочетаний необходимо объединять *n*-граммы в более длинные последовательности.

Для решения этой задачи применим граф специального вида — граф де Брейна [7]. Он получил название в честь голландского математика Николаса де Брейна, который активно изучал свойства графов, построенных по множеству строк. Вершинами в графе де Брейна являются последовательности длины n из алфавита размера t (всего не более t^n вершин), а ориентированное ребро ведет из вершины a в вершину b, если суффикс строки a длины $n-1$ совпадает с префиксом строки b длины $n-1$.

Для получения интерпретируемых признаков *n*-граммы записываются в вершинах графа де Брейна, а ребра соединяют вершины, *n*-граммы которых пересекаются. Линейные пути, извлеченные из такого графа, соответствуют длинным текстовым строкам, которые

могут быть осмыслены с точки зрения предметной области, например, как ключевые слова или фразы на естественном языке.

Однако наиболее широкое применение графы де Брейна нашли в области вычислительной биологии для сборки геномных последовательностей и сравнения образцов геномного и метагеномного секвенирования [8–12]. Для построения графа де Брейна из метагеномных данных все прочтения образца разбиваются на k-меры — строки фиксированной длины k. Они являются аналогами n-грамм, однако извлекаются из строковых данных с пересечениями, что часто не верно для n-грамм. Каждому k-меру сопоставляется вершина в графе де Брейна, в котором ориентированные ребра соединяют k-меры, пересекающиеся на $k-1$ символах. Также в вершинах может быть записана дополнительная информация о k-мерах, например, частота их встречаемости в строках образца.

Актуальной является задача сравнения наборов строковых данных, состоящих из временной серии образцов из одного объекта. Для получения временной серии образцов производится фиксация состояний объекта в начальный и конечный моменты времени, а также при необходимости в нескольких промежуточных точках. В случае с текстовыми данными это могут быть версии статьи, в которую вносились правки, или посты от одного пользователя на заданную тему с похожим содержанием. В области анализа метагеномных данных изучаются сообщества образцов, взятые из одного источника в разные моменты времени. Различия, проявляющиеся в разные моменты времени, могут как быть связаны с сезонными изменениями, так и быть результатом влияния различных внешних факторов. Примерами могут быть анализ образцов воды в разные времена года или анализ микробного состава кишечника человека в динамике в ответ на терапию или трансплантацию микробиоты.

Существующие методы анализа метагеномных данных не позволяют извлекать интерпретируемые признаки, которые содержали бы информацию только о различиях в данных. Потому в настоящей работе предложен метод обработки временных серий образцов, заданных множеством строк, который позволит классифицировать строки по их встречаемости в данных и извлечь из каждой временной точки изучаемого образца общие и уникальные части. Этот метод может использоваться не только для анализа метагеномных данных, но для данных из любых областей, которые представляются в виде наборов строк. Например, с его помощью может проводиться анализ изменения постов человека в социальной сети на заданную узкую тему с течением времени.

Метод сравнения двух образцов на основе графа де Брейна для детекции изменений

Разработанный метод для сравнения двух образцов, представленных в виде набора строк, состоит в следующем. Один из образцов назовем *эталонным*, он соответствует исходному состоянию объекта, с которым проводится сравнение. Второй образец определим *анализируемым*, он соответствует новому состоянию исследуемого объекта, строки которого будут анализироваться. Метод состоит из следующих этапов.

Этап 1. Строки эталонного образца разбиваются на k-меры, из которых строится граф де Брейна. Вершинам соответствуют k-меры, а ребрам — пересечения длиной $k-1$.

Этап 2. Строки анализируемого образца разбиваются на k-меры. Осуществляется их поиск в графе де Брейна: каждый k-мер ищется в множестве k-меров, соответствующих вершинам графа де Брейна. В результате для каждой строки из анализируемого образца собирается информация о встречаемости его k-меров в графе де Брейна эталонного образца.

Этап 3. Строки из анализируемого образца разделяются на группы на основе рассчитываемых по частоте встречаемости k-меров статистик. Рассмотрим подробнее четыре решения данной задачи.

Все решения, используемые на этапе 3, направлены на установление факта встречаемости строки из анализируемого образца в множестве строк эталонного образца. Выбор решения зависит от анализируемых данных, доступных ресурсов и необходимости дальнейшего анализа данных. В таблице представлено сравнение решений на основе следующих параметров: парные прочтения (использование информации о связях между парами строк в метагеномных данных), исправление ошибок (использование информации о точности данных метагеномного секвенирования для исправления ошибок в строках), число категорий (число групп, на которые классифицируются строки анализируемого образца).

Решение 1 является базовым, на котором основаны решения 2–4, и состоит в следующем. Вначале для строки вычисляется глубина покрытия k-мерами как

Таблица. Сравнение четырех предложенных решений для разбиения строк на группы в методе сравнения двух образцов

Table. Comparison of four proposed solutions for strings classification in method for two samples comparison

Номер решения	Число значений k	Парные прочтения	Исправление ошибок	Число категорий	Условия применения
1	1	нет	нет	2	Первичное сравнение образцов
2	2	нет	нет	3	Сравнение похожих образцов
3	1	да	нет	2	Парная информация сохраняется для анализа и сборки
4	2	да	да	6	Лучшая детализация различий, наиболее ресурсоемкий вариант

средняя частота встречаемости *k*-меров из строки в графе де Брейна. Затем для строки вычисляется ширина покрытия как отношение числа покрытых в строке символов *k*-мерами к длине строки. Далее наблюдаемая ширина покрытия сравнивается с теоретической шириной покрытия, рассчитываемой на основе глубины покрытия и распределения Пуассона [13]. Если наблюдаемая ширина покрытия попадает в доверительный интервал теоретической ширины с уровнем доверия 95 %, и при этом ширина покрытия больше задаваемого при запуске пользователем параметра (по умолчанию 0,9), то она помещается в группу обнаруженных строк. В противном случае строка помещается в группу необнаруженных строк. Группа обнаруженных строк соответствует части данных анализируемого образца, которая сохранилась из эталонного образца. Группа необнаруженных строк соответствует части данных анализируемого образца, которой не было в эталонном образце. В дальнейшем обе группы обрабатываются по отдельности для интерпретации данных в предметной области и получения информации о том, какая часть данных сохраняется между образцами, а какая появляется в результате внешнего воздействия на образец.

Решение 2 модифицирует решение 1 с помощью добавления возможности выбора второго значения *k* для построения графа де Брейна и извлечения *k*-меров из строк. Выбор значения параметра *k* может влиять на обнаружение строк, так как слишком маленькие его значения могут привести к случайным совпадениям, а слишком большие — к построению несвязного графа. Пользователь задает два различных значения параметра *k* и строка считается обнаруженной, только если она удовлетворяет условиям из решения 1 при обоих значениях. Если строка удовлетворяет условиям только для одного значения *k*, то она помещается в группу *частично обнаруженных* строк. Оставшиеся строки помещаются в группу необнаруженных строк.

Решения 3 и 4 используют особенности строковых данных, получаемых в результате метагеномного секвенирования, для которого характерно наличие информации о связях между парами строк, а также информации о точности определения каждого символа в строке.

Решение 3 обрабатывает данные, которые имеют парную структуру: для каждой строки во входных данных существует другая строка (известная на основе метаданных). Обе строки из пары должны либо присутствовать в анализируемом образце, либо отсутствовать в нем. Исходя из этого, при получении разных результатов классификации для двух прочтений из одной пары, оба прочтения попадают в группу необнаруженных в эталонном образце. Прочтение попадает в группу обнаруженных строк, только если оно само и парное к нему удовлетворяют условиям из решения 1.

Решение 4 использует информацию о наличии ошибок в данных. Современные технологии получения строковых данных метагеномного секвенирования обычно обеспечивают не более одной ошибки в строке, а также сохраняют дополнительную информацию о качестве определения каждой позиции в строке. В случае неудачной попытки обнаружения прочтения в эталонном образце предпринимается попытка исправить один символ в строке с худшим качеством (если его значение ниже задаваемого порога). Если исправленный вариант строки обнаруживается в эталонном образце, то считается, что в исходной строке была ошибка, и она относится к категории обнаруженных.

Метод сравнительного анализа временных серий наборов данных из трех образцов

На основе метода сравнения двух образцов, представленных в виде множества строк, в настоящей работе разработан метод для анализа временных серий из трех образцов с использованием графов де Брейна. Рассматривается ситуация, в которой два образца соответствуют одному *исследуемому* объекту, имеющему *исходное* и *итоговое* состояния. Третий образец аналогичен *модифицирующему* объекту, который вносит изменения в набор строк исследуемого объекта. Метод используется для отслеживания изменений, которые добавляются в исследуемый объект с помощью другого объекта, и состоит из следующих этапов.

Этап 1. Для каждого образца строится отдельный граф де Брейна. Вершинам соответствуют *k*-меры, а ребрам — пересечения длиной $k - 1$.

Этап 2. *k*-меры исходного образца выравниваются по итоговому образцу для того, чтобы получить разбиение на вытесненную и сохранившуюся в результате модификаций часть данных.

Этап 3. *k*-меры модифицирующего образца выравниваются по итоговому образцу для того, чтобы понять, какая часть изменений была принята, а какая — отклонена.

Этап 4. *k*-меры итогового образца поочередно выравниваются по исходному и модифицирующему образцам. Таким образом, получаются четыре группы строк: сохранившиеся от исходного состояния прочтения, приобретенные от модифицирующего объекта прочтения, общие для исследуемого и модифицирующего объектов прочтения, а также уникальные для итогового состояния прочтения, связанные с естественной вариацией в метагеномных данных.

На основе использования этого метода извлекаются 8 групп строк. Схема разбиения исходных данных для каждого образца временной серии из трех метагеномов представлена на рис. 1. Иногда возникает необходимость анализа исследуемого образца, для которого доступно более чем две временные точки (например, до изменений, сразу после изменений и через фиксированные промежутки времени после изменений) для определения закрепления изменений в образце. В таком случае в качестве итогового образца поочередно используются временные точки после изменений и делается вывод о наличии стабильных изменений.

Вычислительные эксперименты

Метод был реализован в виде пайплайна на языке программирования Shell и размещен в открытом доступе[1]. Для валидации разработанного метода были прове-

[1] [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://doi.org/10.5281/zenodo.15570956 (дата обращения: 16.06.2025).

Рис. 1. Схема разбиения строк на 8 групп с применением графов де Брейна при анализе временной серии из трех образцов, представленных в виде множества строк

Fig. 1. Scheme of strings classification into 8 categories using de Bruijn graphs in time series analysis of three samples represented as sets of strings

дены вычислительные эксперименты с использованием сгенерированных данных, моделирующих строковые данные, применяемые в прикладных задачах.

Наборы данных. Для тестирования предложенного метода анализа временных серий были рассмотрены строковые данные на примере секвенирования метагеномных образцов. Сгенерированы два типа модельных данных. Первый тип данных позволяет установить, насколько близкие организмы может различить представленный метод. Второй тип дает возможность понять точность метода анализа временных серий из трех образцов в зависимости от числа видов бактерий в образце и объема данных.

Первый тип модельных данных использовался для оценки точности обнаружения различий между метагеномными данными, содержащими похожие виды бактерий, в зависимости от степени подобия геномов и средней глубины покрытия образца.

Различение близких видов и штаммов является важной задачей, поскольку некоторые штаммы одного вида могут быть патогенными для организма носителя, в то время как другие штаммы этого вида — безвредны. Для генерации образцов применено множество из 12 геномов штаммов кишечной палочки (*E.Coli*). Было сгенерировано 27 модельных наборов данных с различными параметрами, выбор которых описан в подразделе «Методика эксперимента». Каждый набор состоит из трех образцов: исходного, модифицирующего и итогового. Для исходного и модифицирующего образцов случайным образом выбиралось по одному штамму кишечной палочки. Итоговый образец состоит из двух штаммов: объединения из исходного и модифицирующего образцов. Из референсных геномов штаммов с помощью программы InSilicoSeq [14] производилась генерация строковых данных: метагеномных прочтений, моделирующих выходные данные от секвенатора IlluminaHiSeq.

Второй тип модельных данных использовался для определения точности работы метода при большом объеме данных и большом числе видов организмов в образце. Итоговый образец содержал как геномы бактерий из исходного и модифицирующего образцов, так и новые геномы. Было сгенерировано 15 модельных наборов данных с различными параметрами, выбор которых описан в подразделе «Методика эксперимента». Каждый набор состоит из трех образцов: исходного, модифицирующего и итогового. Для генерации образцов применен открытый набор данных из 1520 видов референсных геномов бактерий, присутствующих в кишечнике человека [15]. Число геномов в каждом образце зависело от выбранных параметров эксперимента. Из референсных геномов штаммов с помощью программы InSilicoSeq с параметрами запуска по умолчанию производилась генерация строковых данных: метагеномных прочтений, моделирующих выходные данные от секвенатора IlluminaHiSeq. Относительная представленность видов бактерий внутри образца подчинялась экспоненциальному распределению.

Методика эксперимента. В первом типе данных моделировалась ситуация, когда в исходном и модифицирующем образцах присутствуют разные штаммы, которые затем обнаруживаются вместе в итоговом образце. Было проведено 27 экспериментов с девятью различными парами геномов и тремя уровнями глубины покрытия. Частота совпадений между геномами оценивалась с помощью программы Mash [16] (ось абсцисс на рис. 2). Для каждого эксперимента генерировался набор из трех образцов, которые обрабатывались с помощью разработанного метода анализа временных серий.

Для второго типа данных было проведено 15 экспериментов, которые отличались тремя видами сложности и пятью видами глубины покрытия. Сложность задавалась числом различных геномов в образце, выбранных случайным образом из 1520 референсных геномов: низкая сложность — 30 геномов, средняя — 100 геномов, высокая — 300 геномов. Для каждого эксперимента генерировался набор из трех образцов, которые обрабатывались с помощью разработанного метода анализа временных серий.

Для оценки точности классификации строк использовались метрики полноты и точности [17]. Точность определяется как доля верно классифицированных строк среди всех классифицированных. Полнота определяется как доля верно классифицированных строк среди истинных, которые должны принадлежать данной группе.

Результаты. Результаты верного обнаружения прочтений для референсных геномов штаммов для каждой из 8 получаемых групп строк (заголовки графиков) оценивались с помощью метрик полноты (рис. 2, *а*) и

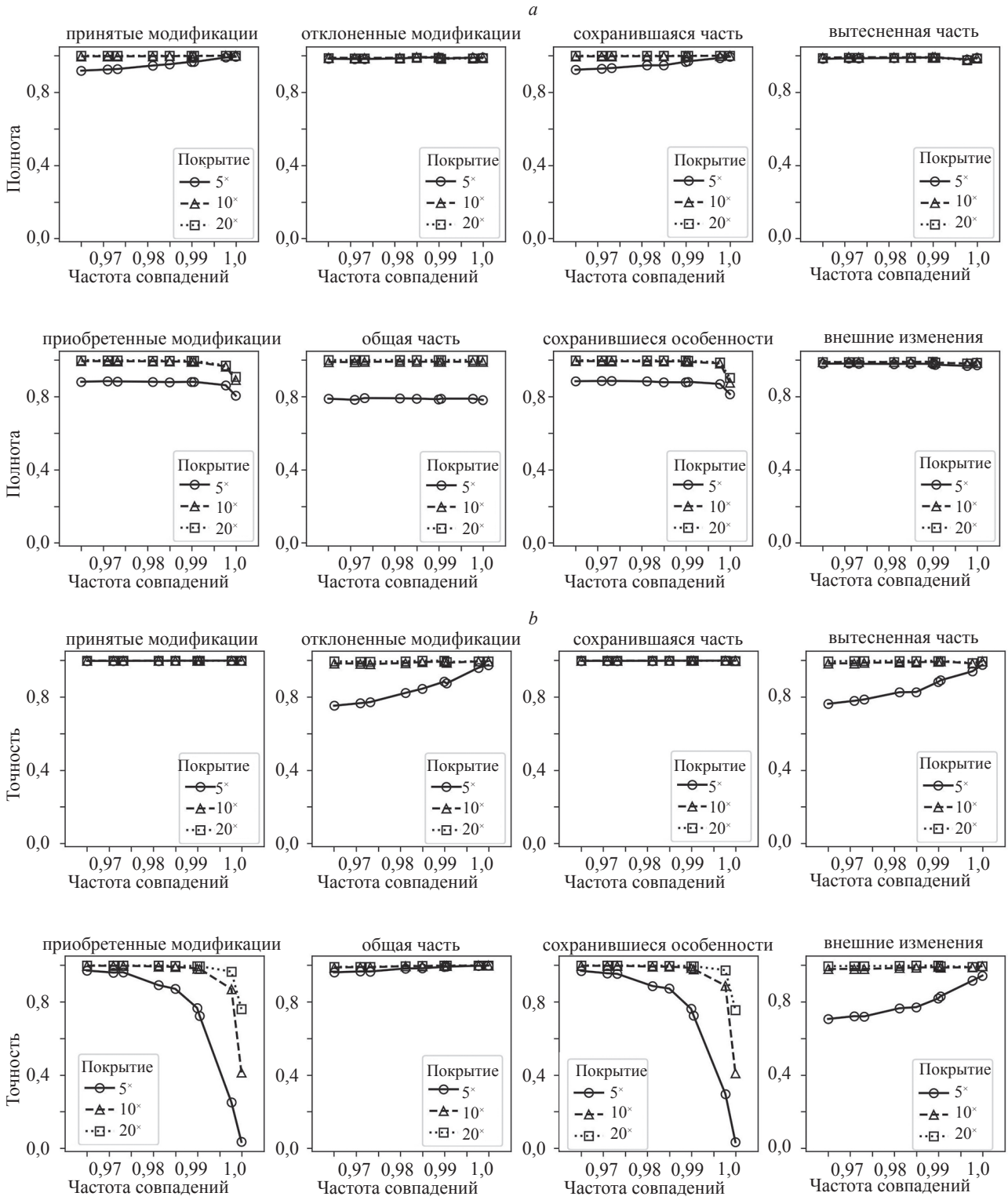


Рис. 2. Полнота (*a*) и точность (*b*) обнаружения прочтений из штаммов исследуемого и модифицирующего объектов, сосуществующих в итоговом объекте.

Частота совпадений соответствует схожести геномов

Fig. 2. Recall (*a*) and Precision (*b*) of reads detection from strains of the studied and modifying object coexisting in the final object

точности (рис. 2, *b*). Из графиков видно, что уже при глубине покрытия образца увеличением в $10^{\times}$ разработанный метод позволяет достоверно различить штаммы с частотой несовпадений до одного на 10 000 нуклеотидов, что равно максимальной точности современных секвенаторов коротких прочтений. Дальнейшее увеличение точности нецелесообразно, поскольку невозможно будет отличить истинную классификацию строк на группы от классификации, получаемой в результате наличия ошибок в данных.

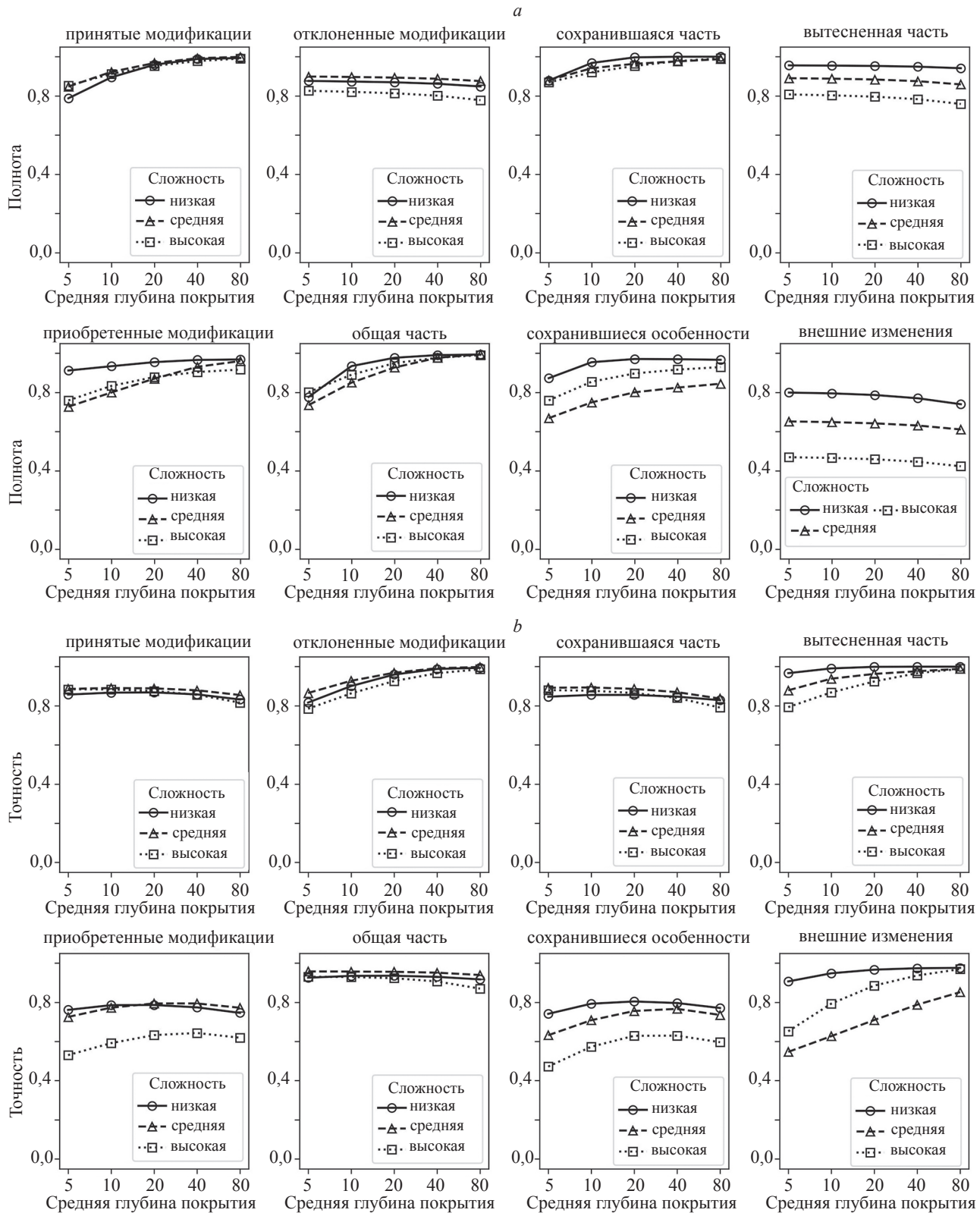


Рис. 3. Полнота (*a*) и точность (*b*) обнаружения прочтений для наборов данных в зависимости от числа геномов и глубины покрытия (в кратах)

Fig. 3. Recall (*a*) and Precision (*b*) of reads detection for datasets vs. the number of genomes and depth coverage

Результаты верного обнаружения прочтений для геномов различных видов для каждой из 8 получаемых групп строк (заголовки графиков) оценивались с помощью метрик полноты (рис. 3, *a*) и точности (рис. 3, *b*). Результаты группировки строк для исходного и модифицирующего образцов, обнаруживаемых в итоговом образце, стремится по метрике полноты к единице с ростом глубины покрытия независимо от сложности

набора данных. Худшее качество получается в группе строк, соответствующих внешним изменениям. Однако в прикладных задачах процент таких строк от общего объема данных является как правило небольшим (от 1 до 5 %), поэтому точность данной группы не является критичной. Также показано, что глубина покрытия играет важную роль независимо от сложности образца, поэтому на этапе сбора данных и их предварительной обработки необходимо учитывать данный параметр: для получения качественных результатов анализа необходимо запускать секвенирование с достаточным покрытием (хотя бы 20×), а также валидировать результаты, полученные на данных с невысоким покрытием.

Обсуждение

Задача сравнения наборов строковых данных, которые изменяются со временем, актуальна во многих прикладных областях. Примерами являются статьи или страницы в сети Интернет, в которые вносятся правки; посты в социальных сетях от одного пользователя или в одной группе на заданную тему. Также строковые данные используются для описания метагеномных образцов из сообществ бактерий, например, населяющих кишечник человека. Изучение таких сообществ помогает выявлять взаимосвязи между набором бактерий и здоровьем человека, работой его иммунной системы и реакцией на различные заболевания и методы лечения.

В работе предложены методы анализа временных серий строковых данных из двух и трех образцов. Отметим, что второй метод, является основным и базируется на первом. Вычислительные эксперименты показали, что второй метод может быть применен для анализа данных микробиоты кишечника, взятых в трех временных точках (например, до лечения, в начале лечения и после окончания лечения). Данные были промоделированы таким образом, чтобы соответствовать сложности реальных микробных сообществ кишечника человека. Результаты экспериментов подтверждают, что предложенный второй метод позволяет с высокой точностью характеризовать изменения, которые происходят во временной серии образцов. Метод позволяет выделить группы прочтений, которые соответствуют как стабильным на протяжении времени бактериям, так и появляющимся или исчезающим в результате терапии. В дальнейшем каждую из полученных групп прочтений возможно анализировать отдельно. Для этого может применяться аннотация с целью установления видов бактерий и их функций, а также сборка геномов и анализ отдельных генов для выявления принципов, которые отвечают за стабильность микробиоты кишечника. Разработанный метод трех образцов может быть применен к открытым данным для формулирования биологических гипотез, которые затем могут быть экспериментально проверены.

Заключение

В работе предложен метод сравнения двух образцов, представленных в виде набора строк. Метод позволяет производить классификацию строк на группы с использованием графов де Брейна и информации о частоте встречаемости *k*-меров. На его основе разработан метод для сравнительного анализа временных серий, состоящих из трех образцов: исходного и итогового состояния одного объекта и другого модифицирующего объекта. В этом методе производится попарное сравнение образцов для разбиения строк на подмножества, соответствующие закрепившимся и не закрепившимся изменениям. В дальнейшем полученные подмножества обрабатываются по отдельности для интерпретации данных в предметной области и получения информации о том, какая часть данных сохраняется между образцами, а какая появляется в результате внешнего воздействия на образец.

Показана высокая точность предложенных методов при анализе модельных данных метагеномного секвенирования. Предложенные методы могут быть использованы для анализа временных серий образцов, например, для изучения динамики изменений микробиоты кишечника пациентов в ответ на терапию или трансплантацию микробиоты. Полученные результаты могут помочь понять принципы изменений в микробных сообществах и лечь в основу систем поддержки принятия решений для модификаций сообществ.

Литература

1. Brown P.F., Della Pietra V.J., Desouza P.V., Lai J.C., Mercer R.L. Classbased *n*-gram models of natural language // Computational Linguistics. 1992. V. 18. N 4. P. 467–480.
2. Cavnar W.B., Trenkle J.M. N-gram-based text categorization // Proc. of the 3rd Annual Symposium on Document Analysis and Information Retrieval (SDAIR-94). 1994. P. 161–175.
3. Rajalakshmi R., Aravindan C. Web page classification using n-gram based URL features // Proc. of the Fifth International Conference on Advanced Computing (ICoAC). 2013. P. 15–21. https://doi.org/10.1109/icoac.2013.6921920
4. Riseman E.M., Hanson A.R. A contextual postprocessing system for error correction using binary *n*-grams // IEEE Transactions on Computers. 1974. V. C-23. N 5. P. 480–493. https://doi.org/10.1109/T-C.1974.223971
5. Sidorov G., Gupta A., Tozer M., Catala D., Catena A., Fuentes S. Rule-based system for automatic grammar correction using syntactic *n*-grams for English language learning (L2) // Proc. of the 17th

References

1. Brown P.F., Della Pietra V.J., Desouza P.V., Lai J.C., Mercer R.L. Classbased *n*-gram models of natural language. *Computational Linguistics*, 1992, vol. 18, no. 4, pp. 467–480.
2. Cavnar W.B., Trenkle J.M. N-gram-based text categorization. *Proc. of the 3rd Annual Symposium on Document Analysis and Information Retrieval (SDAIR-94)*, 1994, pp. 161–175.
3. Rajalakshmi R., Aravindan C. Web page classification using n-gram based URL features. *Proc. of the Fifth International Conference on Advanced Computing (ICoAC)*, 2013, pp. 15–21. https://doi.org/10.1109/icoac.2013.6921920
4. Riseman E.M., Hanson A.R. A contextual postprocessing system for error correction using binary *n*-grams. *IEEE Transactions on Computers*, 1974, vol. C-23, no. 5, pp. 480–493. https://doi.org/10.1109/T-C.1974.223971
5. Sidorov G., Gupta A., Tozer M., Catala D., Catena A., Fuentes S. Rule-based system for automatic grammar correction using syntactic *n*-grams for English language learning (L2). *Proc. of the 17th*

Conference on Computational Natural Language Learning: Shared Task. 2013. P. 96–101.
6. Barrón-Cedeño A., Rosso P. On automatic plagiarism detection based on *n*-grams comparison // Lecture Notes in Computer Science. 2009. V. 548. P. 696–700. https://doi.org/10.1007/978-3-642-00958-7_69
7. Huang S., Zhang H., Bao E. A Comprehensive review of the de Bruijn graph and its interdisciplinary applications in computing // Engineered Science. 2024. V. 28. P. 1061. https://doi.org/10.30919/es1061
8. Idury R.M., Waterman M.S. A new algorithm for DNA sequence assembly // Journal of Computational Biology. 1995. V. 2. N 2. P. 291–306. https://doi.org/10.1089/cmb.1995.2.291
9. Pevzner P.A., Tang H., Waterman M.S. An Eulerian path approach to DNA fragment assembly // Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. 2001. V. 98. N 17. P. 9748–9753. https://doi.org/10.1073/pnas.171285098
10. Compeau P.E.C, Pevzner P.A., Tesler G. How to apply de Bruijn graphs to genome assembly // Nature Biotechnology. 2011. V. 29. N 11. P. 987–991. https://doi.org/10.1038/nbt.2023
11. Nurk S., Meleshko D., Korobeynikov A., Pevzner P.A. metaSPAdes: a new versatile metagenomic assembler // Genome Research. 2017. V. 27. N 5. P. 824–834. https://doi.org/10.1101/gr.213959.116
12. Компо Ф., Певзнер П. Алгоритмы биоинформатики. М.: ДМК-Пресс, 2023. 680 с.
13. Пуассон С.Д. Исследования о вероятности приговоров в уголовных и гражданских делах. Берлин: NG Verlag, 2013. 328 с.
14. Gourlé H., Karlsson-Lindsjö O., Hayer J., Bongcam-Rudloff E. Simulating Illumina metagenomic data with InSilicoSeq // Bioinformatics. 2019. V. 35. N 3. P. 521–522. https://doi.org/10.1093/bioinformatics/bty630
15. Zou Y., Xue W., Luo G., Deng Z., Qin P., Guo R., et al. 1,520 reference genomes from cultivated human gut bacteria enable functional microbiome analyses // Nature Biotechnology. 2019. V. 37. N 2. P. 179–185. https://doi.org/10.1038/s41587-018-0008-8
16. Ondov B.D., Treangen T.J., Melsted P., Mallonee A.B., Bergman N.H., Koren S., Phillippy A.M. Mash: fast genome and metagenome distance estimation using MinHash // Genome Biology. 2016. V. 17. P. 132. https://doi.org/10.1186/s13059-016-0997-x
17. Buckland M., Gey F. The relationship between recall and precision // Journal of the American Society for Information Science. 1994. V. 45. N 1. P. 12–19. https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-4571(199401)45:1<12::AID-ASI2>3.0.CO;2-L

Conference on Computational Natural Language Learning: Shared Task, 2013, pp. 96–101.
6. Barrón-Cedeño A., Rosso P. On automatic plagiarism detection based on *n*-grams comparison. *Lecture Notes in Computer Science*, 2009, vol. 548, pp. 696–700. https://doi.org/10.1007/978-3-642-00958-7_69
7. Huang S., Zhang H., Bao E. A comprehensive review of the de Bruijn graph and its interdisciplinary applications in computing. *Engineered Science*, 2024, vol. 28, pp. 1061. https://doi.org/10.30919/es1061
8. Idury R.M., Waterman M.S. A new algorithm for DNA sequence assembly. *Journal of Computational Biology*, 1995, vol. 2, no. 2, pp. 291–306. https://doi.org/10.1089/cmb.1995.2.291
9. Pevzner P.A., Tang H., Waterman M.S. An Eulerian path approach to DNA fragment assembly. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2001, vol. 98, no. 17, pp. 9748–9753. https://doi.org/10.1073/pnas.171285098
10. Compeau P.E.C, Pevzner P.A., Tesler G. How to apply de Bruijn graphs to genome assembly. *Nature Biotechnology*, 2011, vol. 29, no. 11, pp. 987–991. https://doi.org/10.1038/nbt.2023
11. Nurk S., Meleshko D., Korobeynikov A., Pevzner P.A. metaSPAdes: a new versatile metagenomic assembler. *Genome Research*, 2017, vol. 27, no. 5, pp. 824–834. https://doi.org/10.1101/gr.213959.116
12. Compeau Ph., Pevzner P. Bioinformatics Algorithms: an Active Learning Approach. Active Learning Publishers, 2018, 684 p.
13. Poisson S.-D. *Recherches sur la Probabilité des Jugements en Matière Criminelle et en Matière Civile: Précédées des Règles Générales du Calcul des Probabilités*. Adegi Graphics LLC, 1999, 431 p. (in French)
14. Gourlé H., Karlsson-Lindsjö O., Hayer J., Bongcam-Rudloff E. Simulating Illumina metagenomic data with InSilicoSeq. *Bioinformatics*, 2019, vol. 35, no. 3, pp. 521–522. https://doi.org/10.1093/bioinformatics/bty630
15. Zou Y.,Xue W., Luo G., Deng Z., Qin P., Guo R., et al. 1,520 reference genomes from cultivated human gut bacteria enable functional microbiome analyses. *Nature Biotechnology*, 2019, vol. 37, no. 2, pp. 179–185. https://doi.org/10.1038/s41587-018-0008-8
16. Ondov B.D., Treangen T.J., Melsted P., Mallonee A.B., Bergman N.H., Koren S., Phillippy A.M. Mash: fast genome and metagenome distance estimation using MinHash. *Genome Biology*, 2016, vol. 17, pp. 132. https://doi.org/10.1186/s13059-016-0997-x
17. Buckland M., Gey F. The relationship between recall and precision. *Journal of the American Society for Information Science*, 1994, vol. 45, no. 1, pp. 12–19. https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-4571(199401)45:1<12::AID-ASI2>3.0.CO;2-L

Авторы

Иванов Артем Борисович — младший научный сотрудник, Федеральный научно-клинический центр физико-химической медицины им. академика Ю. М. Лопухина Федерального медико-биологического агентства, Москва, 119435, Российская Федерация; аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, sc 57222438932, https://orcid.org/0000-0002-7997-0637, abivanov@itmo.ru

Шалыто Анатолий Абрамович — доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, профессор, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, sc 56131789500, https://orcid.org/0000-0002-2723-2077, anatoly.shalyto@gmail.com

Ульянцев Владимир Игоревич — кандидат технических наук, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, sc 55062303000, https://orcid.org/0000-0003-0802-830X, ulyantsev@itmo.ru

Authors

Artem B. Ivanov — Junior Researcher, Lopukhin Federal Research and Clinical Center of Physical-Chemical Medicine of Federal Medical Biological Agency (FRCC PCM), Moscow, 119435, Russian Federation; PhD Student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, sc 57222438932, https://orcid.org/0000-0002-7997-0637, abivanov@itmo.ru

Anatoly A. Shalyto — D.Sc., Professor, Chief Researcher, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, sc 56131789500, https://orcid.org/0000-0002-2723-2077, anatoly.shalyto@gmail.com

Vladimir I. Ulyantsev — PhD, Associate Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, sc 55062303000, https://orcid.org/0000-0003-0802-830X, ulyantsev@itmo.ru

Статья поступила в редакцию 22.04.2025
Одобрена после рецензирования 03.06.2025
Принята к печати 17.07.2025

Received 22.04.2025
Approved after reviewing 03.06.2025
Accepted 17.07.2025

Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ
июль–август 2025 Том 25 № 4 http://ntv.ifmo.ru/
SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL OF INFORMATION TECHNOLOGIES, MECHANICS AND OPTICS
Jule–August 2025 Vol. 25 No 4 http://ntv.ifmo.ru/en/
ISSN 2226-1494 (print) ISSN 2500-0373 (online)

doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-4-727-736
УДК 004.094

Применение современных методов оценивания рисков информационной безопасности объекта критической информационной инфраструктуры

Илья Иосифович Лившиц✉

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация
Livshitz.il@yandex.ru✉, https://orcid.org/0000-0003-0651-8591

Аннотация
Рассмотрена практика оценивания рисков информационной безопасности объектов критической информационной инфраструктуры. Выполнено сравнение методов анализа дерева событий, дерева отказов и международного стандарта ISO/IEC 27005:2022, устанавливающего принципы управления рисками. Показаны пути дополнения существующих методических требований Российской Федерации в области безопасности объектов критической информационной инфраструктуры современными методами оценивания рисков информационной безопасности. Выполнено сопоставление современных методов оценивания рисков информационной безопасности на примере системы управления водоснабжением. Обосновано применение необходимого перечня мер защиты, обеспечивающих заданный уровень остаточных рисков информационной безопасности. Продемонстрирована возможность применения современных методов оценивания рисков информационной безопасности объектов критической инфраструктуры в дополнение к существующим методическим требованиям Российской Федерации.

Ключевые слова
критическая инфраструктура, объекты критической информационной инфраструктуры, информационная безопасность, стандарт, риск, оценивание рисков, меры защиты, остаточный риск

Ссылка для цитирования: Лившиц И.И. Применение современных методов оценивания рисков информационной безопасности объекта критической информационной инфраструктуры // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2025. Т. 25, № 4. С. 727–736. doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-4-727-736

Application of modern methods for information security risks evaluation of a critical information infrastructure facility

Ilya I. Livshitz✉

ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation
Livshitz.il@yandex.ru✉, https://orcid.org/0000-0003-0651-8591

Abstract
The practice of assessing IT-security risks of Critical Information Infrastructure (CII) facilities is considered. The methods of Event Tree Analysis (ETA), Fault Tree Analysis (FTA), and the International Standard ISO/IEC 27005:2022, which establishes the principles of risk management, were compared. The ways of supplementing the existing methodological requirements of the Russian Federation in the field of IT-security of CII facilities with modern methods of assessing IT-security risks are shown. A comparison of modern methods for assessing IT-security risks is carried out using the example of a water supply management system. The application of the necessary list of protection measures providing a given level of residual IT-security risks is justified. The possibility of using modern methods for assessing the IT-security risks of CII facilities in addition to the existing methodological requirements of the Russian Federation is demonstrated.

Keywords
critical infrastructure, critical information infrastructure facilities, information security, standard, risk, risk assessment, protection measures, residual risk

© Лившиц И.И., 2025

For citation: Livshitz I.I. Application of modern methods for information security risks evaluation of a critical information infrastructure facility. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2025, vol. 25, no. 4, pp. 727–736 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-4-727-736

Введение

Проблема обеспечения безопасности объектов критической информационной инфраструктуры (КИИ) не является новой. В Российской Федерации известны требования, разработанные различными регуляторами (Приказ ФСТЭК № 235[1], Приказ ФСТЭК № 239[2] и другие). Однако в актуальной нормативной базе практически не рассмотрен полный цикл управления рисками, в частности в «Методике оценки угроз безопасности информации», утвержденной ФСТЭК России 5 февраля 2021 г. (п. 2.3, ж, п. 2.7, а; п. 3.2, д), указано неоднозначное и сложно определенное «замещение» термина «ущерб» термином «риск». При этом практики оценивания результативности мер защиты и расчета остаточных рисков в полном замкнутом цикле не приведено. В методическом документе «Методика оценки показателя состояния технической защиты информации и обеспечения безопасности значимых объектов критической информационной инфраструктуры Российской Федерации»[3], утвержденном ФСТЭК России 2 мая 2024 г., приведен перечень частных показателей безопасности, их наименования и максимальные значения, но только применительно к обеспечению безопасности объектов КИИ от актуальных угроз безопасности информации (УБИ). К сожалению, в рассматриваемом документе риски (остаточные риски) не рассматриваются.

Объективно наблюдается неполнота оценки безопасности объектов КИИ из-за пропуска этапа оценивания рисков после определения актуальных УБИ и перехода сразу к выбору средств защиты. Представляется целесообразным повысить точность и скорость оценивания актуального уровня информационной безопасности объектов КИИ за счет дополнения существующих методических требований подходящими методами оценки рисков.

Анализ известных методов менеджмента рисков

В современной научной литературе приведено достаточно примеров применения современных национальных и международных стандартов менеджмента рисков на практике, в том числе и для защиты объектов КИИ. Например, известны работы в области строительства [1, 2], судостроения [3], анализа геологических данных для предупреждения катастроф [4], в ядерной отрасли [5], на железнодорожном транспорте [6]. Помимо общего [7] и специального отраслевого анализа [8], известны публикации по оценке рисков применительно к области обеспечения информационной безопасности (ИБ), в частности, описан инцидент с атакой SolarWind [9]. В отечественной научной практике [2, 7, 10, 11], а также в зарубежных публикациях [4–6, 12, 13] рассматриваются различные аспекты применения современных стандартов управления рисками. Крайне важно, что в указанных публикациях предоставляется именно «инженерный» уровень применения множества методов управления рисками (например, в IEC 31010:2019[4] их более 40), а не обобщенные «наукообразные» конструкции [14, 15].

Для оценивания рисков ИБ на объектах КИИ рассмотрим кратко доступную статистику по причинам, источникам и факторам появления таких рисков. Например, в обзоре российской компании «СёрчИнформ»[5] представлены данные за 2024 г., структурированные по нескольким аналитическим разрезам, что будет далее востребовано при оценивании рисков ИБ. В частности, в указанном обзоре предоставляются данные по статистике утечки данных сотрудниками (рис. 1) и, как можно видеть, доля компаний, которые сталкивались с утечками («сливом») в течение последних двух лет, примерно одинаковая.

Соответственно, при анализе данного риска могут быть приняты во внимание как объем финансирования

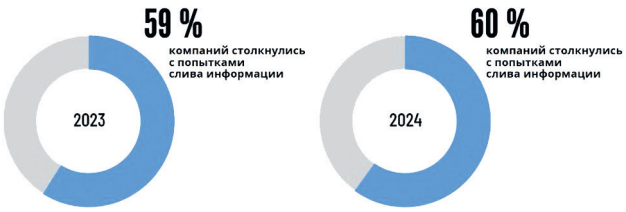


Рис. 1. Статистика утечки данных по вине сотрудников[6]

Fig. 1. Statistics on data leaks caused by employees

[1] [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://fstec.ru/dokumenty/vse-dokumenty/prikazy/prikaz-fstek-rossii-ot-21-dekabrya-2017-g-n-235?ysclid=m7ltp57ouk63751815 (дата обращения: 03.06.2025).

[2] [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://fstec.ru/dokumenty/vse-dokumenty/prikazy/prikaz-fstek-rossii-ot-25-dekabrya-2017-g-n-239?ysclid=m7ltpaukr2631376170 (дата обращения: 03.06.2025).

[3] [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://fstec.ru/dokumenty/vse-dokumenty/spetsialnye-normativnye-dokumenty/metodicheskij-dokument-ot-2-maya-2024-g?ysclid=m832n4zdm5637837561 (дата обращения: 03.06.2025).

[4] [Электронный ресурс]. Режим доступа: IEC 31010:2019. Risk management – Risk assessment techniques (https://www.iso.org/standard/72140.html) (дата обращения: 03.06.2025).

[5] [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://searchinform.ru/news/company-news/2024/11/22/a-study-of-the-level-of-information-security-in-moscow-companies-in-2024/?utm_source=seclab&utm_medium=media_p&utm_campaign=post_survey_msk&utm_content=polza (дата обращения: 03.06.2025).

[6] [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://searchinform.ru/news/company-news/2024/11/22/a-study-of-the-level-of-information-security-in-moscow-companies-in-2024/?utm_source=seclab&utm_medium=media_p&utm_campaign=post_survey_msk&utm_content=polza (дата обращения: 03.06.2025).

мер защиты (в частности, Data Loss Prevention решений), так и их результативность. Доступна статистика категорий вины сотрудников при утечке информации (рис. 2).

Оценка «чистой» умышленной утечки — 21 % (отдельная категория), но если учесть еще 1/2 по категории «Одинаково часто» (38 %), то общая статистика злого умысла достигнет уже 40 %, что объективно приводит к необходимости переоценки всей системы безопасности на объектах КИИ — комплекса как организационных, так и технических мер. В этом аналитическом аспекте представляется уместным сопоставить действующую методическую базу и стандарты управления рисками, которые предусматривают периодическую оценку рисков, результативности мер защиты и пересмотр остаточных рисков [16, 17].

В дополнение к отчету компании «СёрчИнформ» рассмотрим зарубежный отчет[1], который показывает «классическую» для стандартов ISO прослеживаемость «от актива» (рис. 3).

Ценность данного примера заключается в удельных значениях, присвоенных каждой категории («Актив», «Действия», «Нарушители»). Весьма важно сопоставление различных отчетов (национального и зарубежного), в частности, точность определения категорий «внутренние нарушители», «внешние нарушители», «партнеры» и «прочие».

Также следует отметить полезное детальное распределение по видам действий, что в целом соответствует стандарту ISO/IEC 27005:2022[2] и может быть практически применимо при оценивании рисков для объектов КИИ (например, воздействия партнеров на окружение и/или физическое состояние). Несмотря на

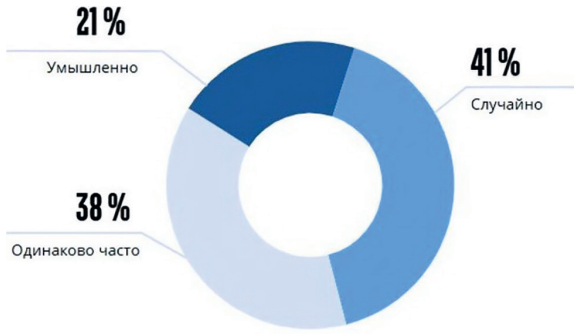


Рис. 2. Статистика категорий вины сотрудников при утечках[3]

Fig. 2. Statistics on employee guilt categories in leaks

минимальные уровни статистического воздействия (по 1 % каждый) именно такие атаки, как показала мировая практика крупнейших вторжений (например, Schneider Electric[4], Colonian Pipeline[5]), приводят к существенному ущербу.

Среди новаций в области управления рисками ИБ представляется возможным отметить два интересных практических предложения.

В Великобритании предложена классификация киберинцидентов по аналогии с природными катастрофами. Классификация[6] будет строиться на двух основных критериях: число «затронутых» инцидентом организаций и финансовые убытки, превышающие 1.000 фунтов стерлингов. Ключевые факторы анализа включают время простоя бизнеса, стоимость восстановления данных, расходы на реагирование и прочее. Тем не менее, штрафы, компенсации и иные платежи не учитываются при базовой оценке.

В Европейском союзе[7] вступил в силу первый этап регулирования искусственного интеллекта (ИИ), соответственно, со 2 февраля 2025 г. запрещены системы, которые несут «неприемлемый риск». К «неприемлемому риску» относят, в частности, реализацию уязвимостей для работников, социальный скоринг для частных (публичных) целей, индивидуальную предиктивную аналитику на базе профилирования сотрудников, биометрическое категорирование на базе национальности, членства в профсоюзах, политической приверженности, религии и прочее.

Весьма примечательно, что в области ИИ Еврокомиссия предполагает введение специальных мер стандартизации, которые должны обеспечить гармонизацию ряда стандартов (в частности, CEN и CENELEC[8]). В целом, эта практика известна, как для стандартов семейства ISO, так и для иных методических документов, например Cobit [8, 18]. Предполагается, что после публикации новых стандартов в официальном издании Official Journal будет введена «презумпция соответствия» всех разрабатываемых ИИ-систем установленным требованиям.

Примеры анализа ИБ объектов КИИ различными методами

Для оценивания рисков ИБ для конкретного объекта КИИ применены три количественных метода:

— метод анализа дерева событий (Event Tree Analysis, ETA) по требованиям IEC 31010:2019;

[1] [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.orangecyberdefense.com/global/security-navigator (дата обращения: 03.06.2025).

[2] [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.iso.org/standard/80585.html (дата обращения: 03.06.2025).

[3] [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://searchinform.ru/news/company-news/2024/11/22/a-study-of-the-level-of-information-security-in-moscow-companies-in-2024/?utm_source=seclab&utm_medium=media_p&utm_campaign=post_survey_msk&utm_content=polza (дата обращения: 03.06.2025).

[4] [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.securitylab.ru/news/549300.php (дата обращения: 03.06.2025).

[5] [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.securitylab.ru/news/520905.php (дата обращения: 03.06.2025).

[6] [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.securitylab.ru/news/556206.php (дата обращения: 03.06.2025).

[7] [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.securitylab.ru/news/556096.php?ysclid=m6uivplqj9626198927 (дата обращения: 03.06.2025).

[8] [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/qanda_21_1683?utm_source=se%D1%81uritylabru (дата обращения: 03.06.2025).

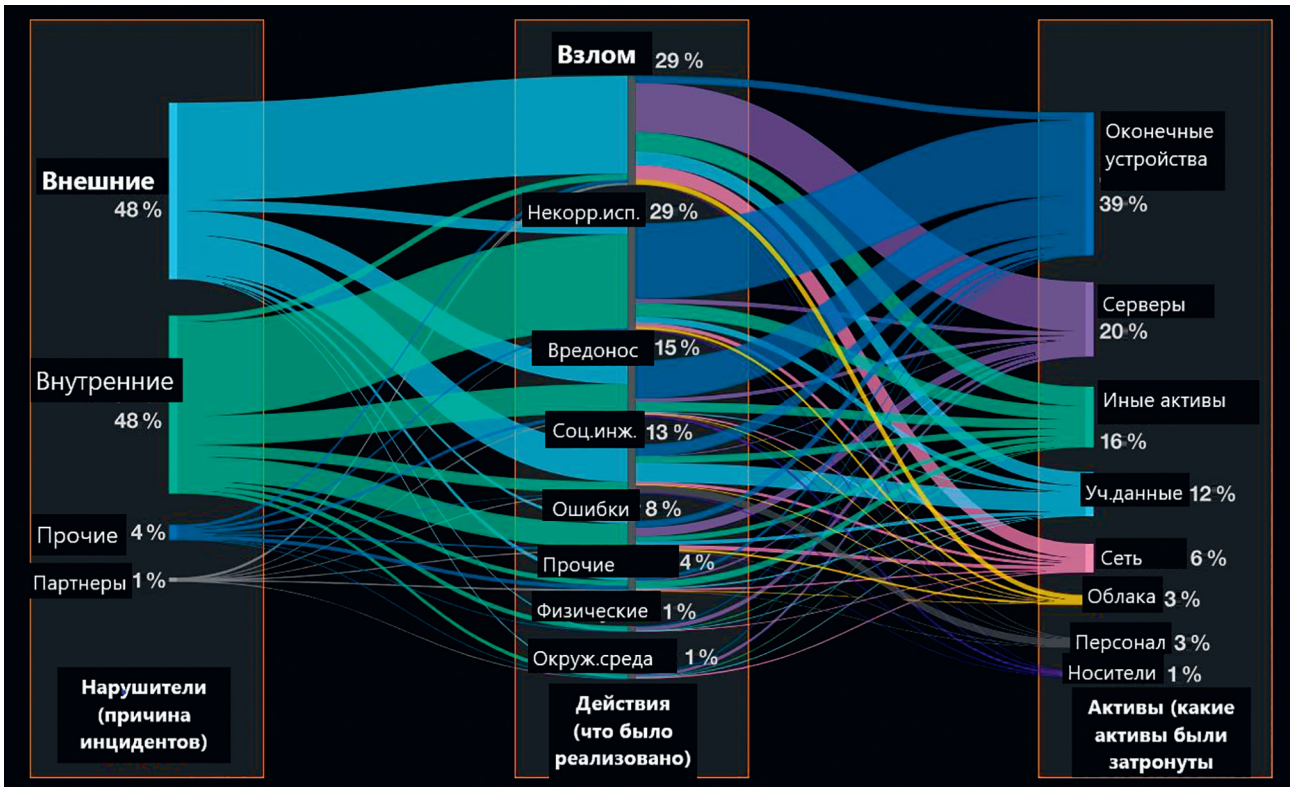


Рис. 3. Статистика по злоумышленникам, действиям и затронутым активам[1]

Fig. 3. Statistics on intruders, actions, and affected assets

— метод анализа дерева отказов (Fault Tree Analysis, FTA) по требованиям IEC 31010:2019;
— метод оценивания рисков по требованиям ISO/IEC 27005:2022.

Кратко поясним выбор именно этих методов для решения поставленной практической задачи оценивания рисков ИБ для конкретного объекта КИИ.

Существующие численные методы (например, марковский анализ, метод Монте-Карло), оперирующие с количественными оценками риска (стандарт IEC 31010:2019), больше ориентированы на оценивание вероятностей, требуют существенно больших затрат на экспертизу и обработку.

Предложенные в настоящей работе методы обеспечивают возможность получения количественных оценок рисков ИБ. Однако такие оценки удобно сопоставлять с размером потенциального ущерба, бюджетом на средства обеспечения безопасности и критериями принятия (обработки) рисков ИБ. Такие методы гарантируют воспроизводимость и повторяемость результатов процесса, что крайне важно для выполнения тестирования собственной командой экспертов ИБ и сопоставления с численными результатами внешнего тестирования.

Рассмотрим задачу сравнения нескольких методов оценивания рисков ИБ системы управления водоснабжением промышленного предприятия, реализованного на базе промышленного логического контроллера (ПЛК). Проблема безопасности систем управления водоснабжением как объекта КИИ признана актуальной[1]. Подобные объекты, как правило, характеризуются высокой сложностью (например, свыше 512 параметров на один технологический блок)[2].

На публичных ресурсах отечественных разработчиков ПЛК (например, DevLink-C1000[3] НПФ «Круг» или АР-8[4] ООО «НПО «Каскад-ГРУП») приведена техническая информация, однако данных о надежности (наработке на отказ), уровне рисков (уровне полноты безопасности или Safety Integrity Level (SIL)) не приведено. Частично указаны отдельные параметры (например, для Программно-технического комплекса «Торнадо-N»[5] приведена наработка на отказ 150 тыс. часов) или представлена информация о ранее выпол-

[1] [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.orangecyberdefense.com/global/security-navigator (дата обращения: 03.06.2025).

[1] [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://xn--90acqjv.xn--p1ai/wp-content/uploads/2019/03/SHipulin.pdf?ysclid=m7vvbwa9pf47435902 (дата обращения: 03.06.2025).

[2] [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://nvtsys.ru/statiya/_06/TEC8_Sargon.pdf (дата обращения: 03.06.2025).

[3] [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.krug2000.ru/products/ptc/promyshlennye-kontrollery/1331.html (дата обращения: 03.06.2025).

[4] [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://kaskad-asu.com/files/controllers/ap-8/re-ap-8.pdf (дата обращения: 03.06.2025).

[5] [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://tornado.nsk.ru/integratoram/product_integrator/ptk/ptk-tornado-n/ (дата обращения: 03.06.2025).

ненных проектах на базе иностранных ПЛК[1] (указан только SIL 2). Отметим, что SIL 2 соответствует целевой мере отказов (риску для объекта КИИ) в диапазоне от 10^{-3} до 10^{-2} по IEC серии 61508[2].

Решение практической задачи для конкретного объекта КИИ предлагается обеспечить на базе «общего» стандарта управления рисками ISO 31000:2018[3] и «специального» стандарта IEC 31010:2019[4]. Дополнительные методы расчета SIL для объектов КИИ в настоящей работе не рассматриваются. Подробно методика анализа рисков и формулы расчетов приведены в IEC серии 61508, некоторые примеры расчета приведены в работе [11]. Международные стандарты ISO (IEC) обладают существенной новизной по сравнению с национальными стандартами системы ГОСТ Р в Российской Федерации.

Оценивание рисков для объекта КИИ по методу ETA. В соответствии с описанием метода (п. B.5.6 стандарта IEC 31010:2019) формируется последовательно «инициируемое событие». Далее на основании статистических данных определяются численные значения вероятностей различных исходов с учетом оценки результативности известных мер защиты («контролей»). Результаты оценивания по методу ETA представлены на рис. 4.

Важным преимуществом метода ETA для решения поставленной задачи является как оценивание «сработки» встроенной системы безопасности (например, на базе оценок SIL по IEC серии 61508), зависимость финального состояния объекта КИИ от значения результативности предшествующих рубежей защиты, так и вероятности перехода объекта КИИ в безопасное состояние. Некоторые особенности расчета SIL применительно к объектам КИИ изложены в работе [15]. Для рассматриваемого примера по методу ETA риск для объекта КИИ составляет 0,0115, т. е. находится в интервале 10^{-3}–10^{-2}, что соответствует уровню SIL 2.

Оценивание рисков для объекта КИИ по методу FTA. В соответствии с описанием метода (п. B.5.7 стандарта IEC 31010:2019) определим последовательно нежелательное «топовое» событие. Далее с помощью булевых логических элементов получим зависимости факторов (типов нарушителей, типов атак и прочее), влияющие на основное «топовое» событие. Результаты оценивания по методу FTA показаны на рис. 5. Важным преимуществом метода FTA для решения поставленной задачи является определение как явных (основных) путей реализации нежелательного «топового события», так и иных путей, которые по строгим логическим правилам (в примере на рис. 5 рассмотрены для компактности только логические элементы «или») могут привести к недопустимому инциденту. В соответствии с рекомендациями стандарта IEC 31010:2019 учтена возможность ретроспективного анализа (например, передача выявленных инцидентов для последующего анализа в специальных системах класса Security Information and Event Management (SIEM)). Некоторые особенности анализа инцидентов ИБ применительно к объектам КИИ изложены в работах [12, 13, 16].

[1] [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://kaskad-asu.com/press-center/newsfeed/modernizirovannaya-spaz-gd-ooo-hevel-vvedena-v-ekspluatatsiyu.html (дата обращения: 03.06.2025).

[2] [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://webstore.iec.ch/en/publication/5515 (дата обращения: 03.06.2025).

[3] [Электронный ресурс]. Режим доступа: ISO 31000:2018. Risk management – Guidelines (https://www.iso.org/standard/65694.html) (дата обращения: 03.06.2025).

[4] [Электронный ресурс]. Режим доступа: IEC 31010:2019. Risk management – Risk assessment techniques (https://www.iso.org/standard/72140.html) (дата обращения: 03.06.2025).

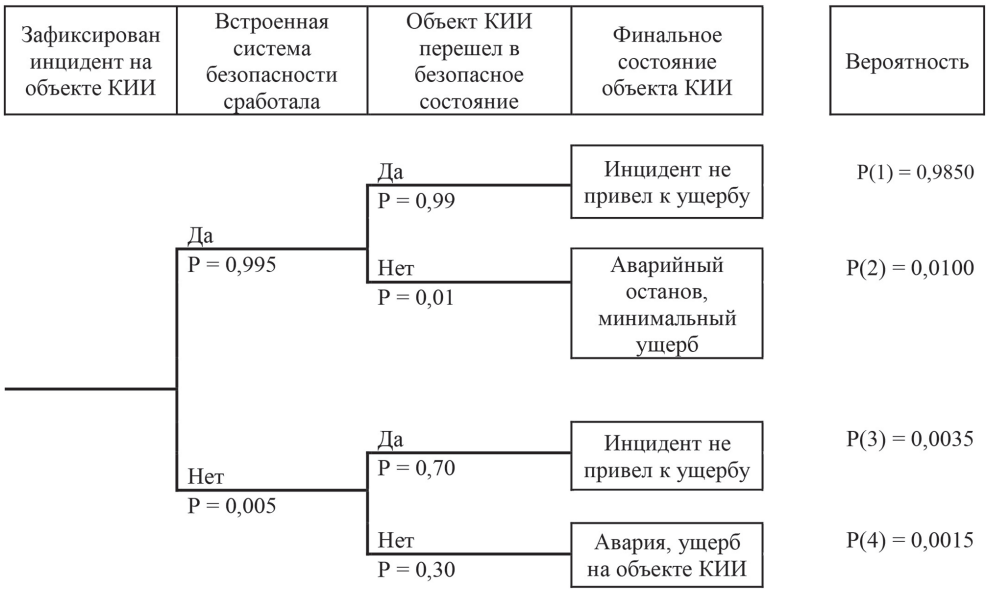


Рис. 4. Пример оценивания рисков для выбранного объекта критической инфраструктуры по методу ETA. P(1)…P(4) — вероятности событий 1…4

Fig. 4. An example of risk assessment for a selected CII facility using the ETA method

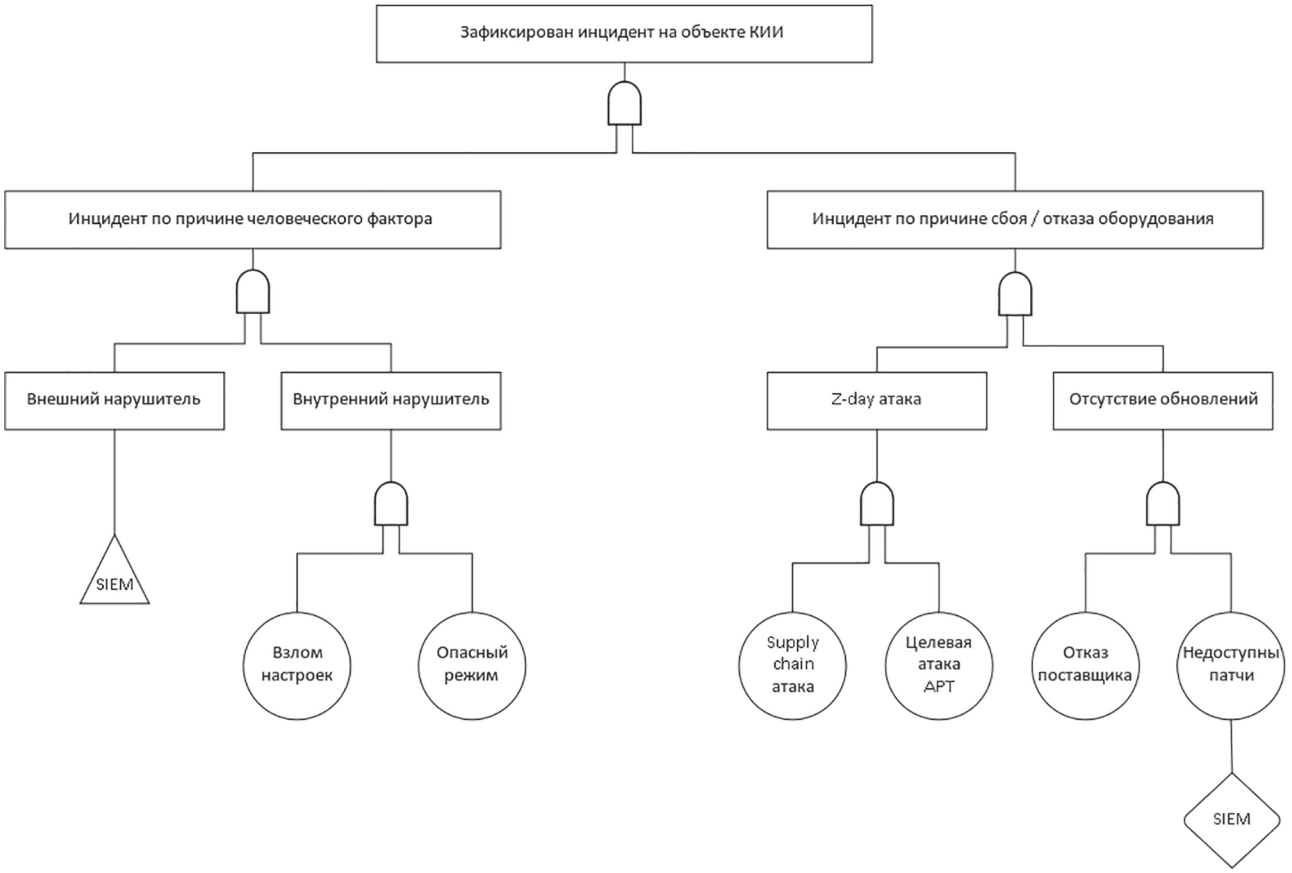


Рис. 5. Пример оценивания рисков для выбранного объекта критической инфраструктуры по методу FTA.
ATP — Advanced Persistent Threat, целевая атака; Z-day — атака «нулевого дня»

Fig. 5. An example of risk assessment for a selected CII facility using the FTA method

С учетом статистики отказов ПЛК (например: DDoS-атаки[1], атаки на встроенное программное обеспечение ПЛК[2], удаленное изменение настроек (9,8 CVSS[3]), обход защиты памяти (9,8 CVSS[4]), атаки серверов SCADA[5] и прочее) для данного примера риск успешной атаки на объект КИИ (при этом встроенная система безопасности не сработала) находится в интервале 10^{-3}–10^{-2}, что соответствует уровню SIL 2.

Пример оценивания рисков для объекта КИИ по методу ISO/IEC 27005:2022. В соответствии с данным стандартом определяется последовательно перечень активов, присущие им уязвимости, актуальные УБИ, реализуемые риски ИБ, встроенные меры защиты и остаточные риски ИБ. Результаты представлены в табл. 1. Примеры уязвимостей и УБИ приведены в ISO/IEC 27005:2022 (табл. А.10 и А.11), перечень мер защиты — в ISO/IEC 27001:2022 (табл. А.1).

В качестве критериев приемлемости риска и принятия остаточного риска в методе ISO/IEC 27005:2022 применяется интервальное значение риска 10^{-3}–10^{-2}, что эквивалентно уровню SIL 2. Остаточный риск принимается менее 10^{-2}, что эквивалентно уровню SIL 1. Это критериальное значение может быть независимо верифицировано по данным производителя, а в случае отсутствия полных данных — подтверждено по данным независимых испытаний или расчетов по известным формулам (например, IEC серии 61508).

Сопоставление методов оценивания рисков ИБ для объектов КИИ. На основании требований стандартов IEC 31010:2019 (соответственно, ETA и FTA) и ISO/IEC 27005:2022, а также практических результатов работ [10, 15, 16], сопоставление методов оценивания рисков ИБ для конкретного объекта КИИ представлено в табл. 2.

[1] [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.securitylab.ru/news/498862.php (дата обращения: 03.06.2025).

[2] [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.ndss-symposium.org/wp-content/uploads/2024-49-paper.pdf?utm_source=se%D1%81uritylabru (дата обращения: 03.06.2025).

[3] [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.securitylab.ru/news/499700.php (дата обращения: 03.06.2025).

[4] [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.securitylab.ru/news/520675.php (дата обращения: 03.06.2025).

[5] [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.securitylab.ru/news/538973.php ((дата обращения: 03.06.2025).

Таблица 1. Пример оценивания рисков ИБ для выбранного объекта КИИ по методу ISO/IEC 27005:2022
Table 1. An example of risk assessment for a selected CII facility using the ISO/IEC 27005:2022 method

Актив в составе объекта КИИ	Базовые меры защиты	Уязвимости	УБИ	Риск	Уровень риска (SIL)	Критерий приемлемости риска	Решение о принятии риска	Дополнительные меры защиты	Значение остаточного риска (SIL)	Подтверждение принятия остаточного риска
Встроенное ПО ПЛК	A.5.18	Хорошо известные недостатки в ПО	Злоупотребление правами или разрешениями	Отказ ПЛК	Высокий (SIL 2)	Средний (SIL 1)	Обработка	A.5.21	Средний (SIL 1)	Принятие
	A.8.4	Слабый менеджмент паролей						A.5.22		
Электропривод насосов	A.5.29	Недостаточное техническое обслуживание	Неисправность устройства или системы	Отказ водоснабжения	Низкий (SIL 1)	Средний (SIL 1)	Принятие	—	—	—
	A.8.9	Недостаточный контроль за изменением конфигураций								
Персонал (предприятие)	A.5.3	Недостаточный тренинг в области безопасности	Социальный инжиниринг	Недопустимое воздействие	Средний (SIL 1)	Средний (SIL 1)	Принятие	—	—	—
	A.5.20	Недостаточная осведомленность в области безопасности								
Персонала (подрядчик)	A.5.19	Недостаточность или отсутствие механизмов мониторинга	Несанкционированный доступ на объекты	Недопустимое воздействие	Высокий (SIL 2)	Средний (SIL 1)	Обработка	A.5.30	Средний (SIL 1)	Принятие
	A.8.4	Неправильное использование программного и аппаратного обеспечения						A.5.35		
Помещение системы управления водоснабжения	A.7.3	Неадекватное техническое обслуживание	Значительная авария	Отказ водоснабжения	Низкий (SIL 1)	Средний (SIL 1)	Принятие	—	—	—
Помещение насосной станции	A.7.3	Неадекватное техническое обслуживание	Значительная авария	Отказ водоснабжения	Низкий (SIL 1)	Средний (SIL 1)	Принятие	—	—	—
Репутация	A.5.31	Процедуры сообщения об уязвимостях в системе безопасности не разработаны или их внедрение неэффективно	Нарушение законов или нормативных актов	Санкции, штрафы, проверки	Низкий (SIL 1)	Средний (SIL 1)	Принятие	—	—	—

Таблица 2. Сопоставление методов оценивания рисков

Table 2. Comparison of risk assessment methods

Метод	Описание	Преимущества	Недостатки	Воспроизводимость / повторяемость	Практическая применимость
ETA (IEC 31010:2019)	Модель основана на возможных исходах на основе входных событий и статусов мер защиты, которые анализируются по вероятностям и частотам	— Отображает влияние неэффективных мер контроля в виде диаграммы; — выявляет потенциальные сбои, уязвимости и меры защиты с низкой неэффективностью; — учитывает временные рамки и «эффект домино»	— Для проведения полного анализа необходимо определить все возможные исходные события; — обрабатываются только состояния успешной работы и сбоя системы, и трудно учесть частично работающие элементы (меры защиты)	— Обеспечивается другой командой — собственных экспертов или внешних аудитов; — дополнительно возможно сопоставление с данными производителя (SIL), полученными на стенде	— Для категорирования объектов КИИ; — для аудитов ИБ; — для аудитов функциональной безопасности (SIL)
FTA (IEC 31010:2019)	Модель основана на анализе вариантов с использованием булевой логики для описания комбинаций отказов. Варианты включает дерево успеха с приоритетными событиями и дерево причин, применяемое для расследования событий	— Отличается высокой степенью системности, позволяет анализировать множество факторов; — логический анализ деревьев отказов полезен при выявлении путей выхода из строя компонентов в сложной системе	— Метод оперирует только с бинарными состояниями; — метод анализирует одно главное событие и не учитывает вторичные или случайные сбои; — для крупномасштабных систем структура может быть очень сложной	— Обеспечивается другой командой — собственных экспертов или внешних аудитов; — дополнительно возможно сопоставление с данными производителя (SIL), полученными на стенде	— Для категорирования объектов КИИ; — для аудитов ИБ — для аудитов функциональной безопасности (SIL)
Менеджмент рисков (ISO/IEC 27005:2022)	Модель основана на реализации «классической» последовательности: установления контекста (в том числе критериев приемлемости риска и принятия остаточного риска), оценки риска, обработки рисков и принятия рисков	— Предварительно определены каталоги типовых УБИ и уязвимостей; — доступны шкалы оценивания вероятности и ущерба для формирования значения риска; — четкая структура управления рисками с двумя контрольными точками	— Метод не учитывает зависимости (последовательность) контролей; — для крупномасштабных систем результирующие числленные оценки могут быть очень сложными и громоздкими	— Обеспечивается другой командой — собственных экспертов или внешних аудитов; — дополнительно возможно сопоставление с данными аудиторов при сертификации по требованиям ISO/IEC 27001	— Для учета инцидентов, УБИ и рисков по требованиям (БДУ ФСТЭК, OWASP, MITRE ATT&CK и прочее); — для категорирования объектов КИИ; — для аудитов ИБ; — для аудитов функциональной безопасности (SIL)

Заключение

Рассмотренные методы оценки риска информационной безопасности объектов критической инфраструктуры позволяют объективно обосновать количественные оценки и достоверно сформировать перечень необходимых мер защиты, обеспечивающих заданный уровень остаточных рисков. Полученные результаты могут быть применимы владельцами объектов критической инфраструктуры, заинтересованными в обеспечении заданного уровня безопасности на базе современных методов менеджмента рисков информационной безопасности, предоставляющих сопоставимые и воспроизводимые результаты.

Литература

1. Варламова Д.В., Долженкова А.В., Корочкина С.В. Автоматизация в Риск-менеджменте // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Экономика и экологический менеджмент. 2020. № 4. С. 78–86. https://doi.org/10.17586/2310-1172-2020-13-4-78-86
2. Иващенко И.Н., Гончаров М.А. Безопасность и риск эксплуатируемых сооружений: Методология оперативной оценки // Проблемы анализа риска. 2021. Т. 18. № 6. С. 66–83. https://doi.org/10.32686/1812-5220-2021-18-6-66-83
3. Yusup M.F.B. Application of risk management in shipyards based SNI IEC/ISO 31010:2016 on new shipbuilding projects // Maritime Park: Journal of Maritime Technology and Society. 2022. V. 1. N 2. P. 75–78. https://doi.org/10.62012/mp.v1i2.32646
4. Frantzova A. Comprehensive methodology for geological risk and multy-risk assessment // Review of the Bulgarian Geological Society. 2021. V. 82. Part 3. P. 171–173. https://doi.org/10.52215/rev.bgs.2021.82.3.171
5. Neto A.B.C. Risk to be considered in nuclear reactor decommissioning projects in Brazil // Brazilian Journal of Radiation Sciences. 2022. V. 10. N 4. P. 1–24. https://doi.org/10.15392/2319-0612.2022.2111
6. Lesniak A., Janowiec F., Benavides J.R. The risk of additional branch work in the construction of railway projects // Archives of Civil Engineering. 2024. V. 70. N 2. P. 643–659. https://doi.org/10.24425/ace.2024.149886
7. Никифорова Н.А. Стратегический анализ: Международный стандарт ISO 31000:2018 и ГОСТ Р ИСО 31000-2019 // Финансовый бизнес. 2022. № 4 (226). С. 41–46.
8. Sukmana P.P., Yoga T.P., Habibi Ch. Audit manajemen risiko sistem informasi pada Website Digo.id dengan framework Cobit 5 dan ISO 31000 // Jurnal Accounting Information System (AIMS). 2023. V. 6. N 2. P. 180–201. https://doi.org/10.32627/aims.v6i2.816
9. Lavrnić I., Bašić A., Viduka D. Risk assessment of a solar attack according to ISO 31000 standard // Engineering Review. 2021. V. 41. N 1. P. 120–128. https://doi.org/10.30765/er.1566
10. Лившиц И.И. Практика управления киберрисками в нефтегазовых проектах компаний холдингового типа // Вопросы кибербезопасности. 2020. № 1 (35). С. 42–51. https://doi.org/10.21681/2311-3456-2020-01-42-51
11. Лившиц И.И., Сунцова Д.И. Численный расчет функциональной безопасности компонентов технически сложных промышленных объектов // Автоматизация в промышленности. 2023. № 7. С. 9–15. https://doi.org/10.25728/avtprom.2023.07.02
12. Yuwono M.A., Rachmawati D. Penerapan fraud risk management pada divisi pembelian PT. Lestari menggunakan ISO 31000:2018 // Jurnal Akuntansi Kontemporer. 2023. V. 15. N 3. P. 131–142. https://doi.org/10.33508/jako.v15i3.4629
13. Masita I. Analysis of risk management implementation in the internal audit unit (SPI) Politeknik pelayaran surabaya using ISO 31000 // Robust: Research of Business and Economics Studies. 2022. V. 2. N 2. P. 113–126. https://doi.org/10.31332/robust.v2i2
14. Livshitz I.I., Lontsikh P.A., Lontsikh N.P., Kunakov E.P., Drolova E.Y. Implementation and auditing of risk management for the oil and gas company // Proc. of the International Conference "Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies" (IT&QM&IS). 2017. P. 539–543. https://doi.org/10.1109/itmqis.2017.8085881
15. Livshitz I.I., Neklyudov A.V., Lontsikh P.A. IT security evaluation - "hybrid" approach and risk of its implementation // Journal of Physics: Conference Series. 2018. V. 1015. N 4. P. 042030. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1015/4/042030
16. Беляев Е.А., Емельянова О.А., Лившиц И.И. Анализ методик оценки рисков информационной безопасности кредитно-финансовых организаций // Научно-технический вестник информаци-

References

1. Varlamova D.V., Dolzhenkova A.V., Korochkina S.V. Automation in risk management. *Scientific journal NRU ITMO Series "Economics and Environmental Management"*, 2020, no. 4, pp. 78–86. (in Russian). https://doi.org/10.17586/2310-1172-2020-13-4-78-86
2. Ivashchenko I.N., Goncharov M.A. Safety and Risk of Operating Facilities: Rapid Assessment Methodology. *Issues of Risk Analysis*, 2021, vol. 18, no. 6, pp 66-83. (in Russian). https://doi.org/10.32686/1812-5220-2021-18-6-66-83
3. Yusup M.F.B. Application of risk management in shipyards based SNI IEC/ISO 31010:2016 on new shipbuilding projects. *Maritime Park: Journal of Maritime Technology and Society*, 2022, vol. 1, no. 2, pp. 75–78. https://doi.org/10.62012/mp.v1i2.32646
4. Frantzova A. Comprehensive methodology for geological risk and multy-risk assessment. *Review of the Bulgarian Geological Society*, 2021, vol. 82, part 3, pp. 171–173. https://doi.org/10.52215/rev.bgs.2021.82.3.171
5. Neto A.B.C. Risk to be considered in nuclear reactor decommissioning projects in Brazil. *Brazilian Journal of Radiation Sciences*, 2022, vol. 10, no. 4, pp. 1–24. https://doi.org/10.15392/2319-0612.2022.2111
6. Lesniak A., Janowiec F., Benavides J.R. The risk of additional branch work in the construction of railway projects. *Archives of Civil Engineering*, 2024, vol. 70, no. 2, pp. 643–659. https://doi.org/10.24425/ace.2024.149886
7. Nikiforova N.A. Strategic analysis: international standard ISO 31000:2018 and GOST R ISO 31000-2019. *Finansovyj Biznes*, 2022, no. 4 (226), pp. 41–46. (in Russian)
8. Sukmana P.P., Yoga T.P., Habibi Ch. Audit manajemen risiko sistem informasi pada Website Digo.id dengan framework Cobit 5 dan ISO 31000. *Jurnal Accounting Information System (AIMS)*, 2023, vol. 6, no. 2, pp. 180–201. https://doi.org/10.32627/aims.v6i2.816
9. Lavrnić I., Bašić A., Viduka D. Risk assessment of a solar attack according to ISO 31000 standard. *Engineering Review*, 2021, vol. 41, no. 1, pp. 120–128. https://doi.org/10.30765/er.1566
10. Livshitz I. Practice of cyber-risks management in oil and gas projects of holding companies. *Voprosy Kiberbezopasnosti*, 2020, no. 1 (35), pp. 42–51. (in Russian). https://doi.org/10.21681/2311-3456-2020-01-42-51
11. Livshits I.I., Suntsova D.I. Numerical calculation of functional safety of the components of technically complex industrial plants. *Avtomatizacija v promyshlennosti*, 2023, no. 7, pp. 9–15. (in Russian). https://doi.org/10.25728/avtprom.2023.07.02
12. Yuwono M.A., Rachmawati D. Penerapan fraud risk management pada divisi pembelian PT. Lestari menggunakan ISO 31000:2018. *Jurnal Akuntansi Kontemporer*, 2023, vol. 15, no. 3, pp. 131–142. https://doi.org/10.33508/jako.v15i3.4629
13. Masita I. Analysis of risk management implementation in the internal audit unit (SPI) Politeknik pelayaran surabaya using ISO 31000. *Robust: Research of Business and Economics Studies*, 2022, vol. 2, no. 2, pp. 113–126. https://doi.org/10.31332/robust.v2i2
14. Livshitz I.I., Lontsikh P.A., Lontsikh N.P., Kunakov E.P., Drolova E.Y. Implementation and auditing of risk management for the oil and gas company. *Proc. of the International Conference "Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies" (IT&QM&IS)*, 2017, pp. 539–543. https://doi.org/10.1109/itmqis.2017.8085881
15. Livshitz I.I., Neklyudov A.V., Lontsikh P.A. IT security evaluation - "hybrid" approach and risk of its implementation. *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, vol. 1015, no. 4, pp. 042030. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1015/4/042030
16. Belyaev E.A., Emelyanova O.A., Livshitz I.I. An analysis of methods for assessing information security risks of financial institutions.

онных технологий, механики и оптики. 2021. Т. 21. № 3. С. 437–441. https://doi.org/10.17586/2226-1494-2021-21-3-437-441
17. Беззатеев С.В., Елина Т.Н., Мыльников В.А., Лившиц И.И. Методика оценки рисков информационных систем на основе анализа поведения пользователей и инцидентов информационной безопасности // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2021. Т. 21. № 4. С. 553–561. https://doi.org/10.17586/2226-1494-2021-21-4-553-561
18. Ezrahovich A.Y., Vladimirtsev A.V., Livshitz I.I., Lontsikh P.A., Karaseva V.A. Risk-based thinking of ISO 9001:2015 — the new methods, approaches and tools of risk management // Proc. of the International Conference “Quality Management,Transport and Information Security, Information Technologies” (IT&QM&IS). 2017. P. 506–511. https://doi.org/10.1109/itmqis.2017.8085872

Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics, 2021, vol. 21, no. 3, pp. 437–441. (in Russian). https://doi.org/10.17586/2226-1494-2021-21-3-437-441
17. Bezzateev S.V., Elina T.N., Mylnikov V.A., Livshitz I.I. Risk assessment methodology for information systems, based on the user behavior and IT-security incidents analysis. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2021, vol. 21, no. 4, pp. 553–561. (in Russian). https://doi.org/10.17586/2226-1494-2021-21-4-553-561
18. Ezrahovich A.Y., Vladimirtsev A.V., Livshitz I.I., Lontsikh P.A., Karaseva V.A. Risk-based thinking of ISO 9001:2015 – the new methods, approaches and tools of risk management. *Proc. of the International Conference “Quality Management,Transport and Information Security, Information Technologies” (IT&QM&IS)*, 2017, pp. 506–511. https://doi.org/10.1109/itmqis.2017.8085872

Автор

Лившиц Илья Иосифович — доктор технических наук, профессор практики, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, sc 57191569306, https://orcid.org/0000-0003-0651-8591, Livshitz.il@yandex.ru

Author

Ilya I. Livshitz — D.Sc., Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, sc 57191569306, https://orcid.org/0000-0003-0651-8591, Livshitz.il@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 25.02.2025
Одобрена после рецензирования 05.06.2025
Принята к печати 22.07.2025

Received 25.02.2025
Approved after reviewing 05.06.2025
Accepted 22.07.2025

Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ
июль–август 2025 Том 25 № 4 http://ntv.ifmo.ru/
SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL OF INFORMATION TECHNOLOGIES, MECHANICS AND OPTICS
Jule–August 2025 Vol. 25 No 4 http://ntv.ifmo.ru/en/
ISSN 2226-1494 (print) ISSN 2500-0373 (online)

doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-4-737-743
УДК 004.258

Оптимизация моделей дистилляции знаний для языковых моделей

Татьяна Михайловна Татарникова[1]✉, Никита Сергеевич Мокрецов[2]

[1] Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, 190000, Российская Федерация
[2] Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, 197022, Российская Федерация

[1] Tm-tatarn@yandex.ru✉, https://orcid.org/0000-0002-6419-0072
[2] mokrecovnikita6374@gmail.com, https://orcid.org/0009-0009-1399-8504

Аннотация

Введение. Обсуждается проблема оптимизации больших нейронных сетей на примере языковых моделей. Размеры больших языковых моделей являются препятствием для их практического применения в условиях ограниченных объемов вычислительных ресурсов и памяти. Одним из развиваемых направлений сжатия моделей больших нейронных сетей служит дистилляция знаний — передача знаний от большой модели учителя к меньшей модели ученика без существенной потери точности результата. Известные в настоящее время методы дистилляции знаний имеют определенные недостатки: неточная передача знаний, долгий процесс обучения, накапливание ошибки в длинных последовательностях. **Метод.** Предлагаются методы, способствующие повышению качества дистилляции знаний применительно к языковым моделям: выборочное вмешательство учителя в процесс обучения ученика и низкоранговая адаптация. Первый подход основан на передаче токенов учителя при обучении ученика на слои нейронной сети, для которых достигается экспоненциально убывающий порог измерений расхождения между распределениями вероятностей учителя и ученика. Второй подход предлагает уменьшение количества параметров в нейронной сети путем замены полносвязных слоев на низкоранговые, что позволяет снизить риск переобучения и ускорить процесс обучения. Показаны ограничения каждого метода при работе с длинными последовательностями. Предложено комбинировать методы для получения усовершенствованной модели классической дистилляции знаний для длинных последовательностей. **Основные результаты.** Применение комбинированного подхода к дистилляции знаний на длинных последовательностях позволило значительно сжать результирующую модель с небольшой потерей качества, а также ощутимо снизить затрачиваемую память GPU и время вывода ответа. **Обсуждение.** Взаимодополняющие подходы к оптимизации процесса передачи знаний и сжатию моделей показали лучшие результаты, чем выборочное вмешательство учителя в процесс обучения ученика и низкоранговая адаптация по отдельности. Таким образом, качество ответов усовершенствованной модели классической дистилляции знаний на длинных последовательностях показало 97 % качества полной донастройки и 98 % качества метода низкоранговой адаптации по показателям ROGUE-L и Perplexity, при учете того, что количество обучаемых параметров снижается на 99 % по сравнению с полной донастройкой и на 49 % в сравнении с низкоранговой адаптацией. Кроме того, использование памяти GPU в сравнении с этими же методами уменьшается на 75 % и 30 % соответственно, а время вывода ответа на 30 %. Предложенная комбинация методов дистилляции знаний может найти применение в задачах с ограниченными вычислительными ресурсами.

Ключевые слова

большие языковые модели, длинные последовательности, нейронные сети, дистилляция знаний, модель учителя, модель ученика, выборочное вмешательство в процесс обучения, низкоранговая адаптация

Ссылка для цитирования: Татарникова Т.М., Мокрецов Н.С. Оптимизация моделей дистилляции знаний для языковых моделей // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2025. Т. 25, № 4. С. 737–743. doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-4-737-743

© Татарникова Т.М., Мокрецов Н.С., 2025

Optimizing knowledge distillation models for language models

Tatiana M. Tatarnikova[1]✉, Nikita S. Mokretsov[2]

[1] Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation (SUAI), Saint Petersburg, 190000, Russian Federation

[2] Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", Saint Petersburg, 197022, Russian Federation

[1] Tm-tatarn@yandex.ru✉, https://orcid.org/0000-0002-6419-0072

[2] mokrecovnikita6374@gmail.com, https://orcid.org/0009-0009-1399-8504

Abstract

The problem of optimizing large neural networks is discussed using the example of language models. The size of large language models is an obstacle to their practical application in conditions of limited amounts of computing resources and memory. One of the areas of compression of large neural network models being developed is knowledge distillation, the transfer of knowledge from a large teacher model to a smaller student model without significant loss of result accuracy. Currently known methods of distilling knowledge have certain disadvantages: inaccurate knowledge transfer, long learning process, accumulation of errors in long sequences. The methods that contribute to improving the quality of knowledge distillation in relation to language models are proposed: selective teacher intervention in the student's learning process and low-level adaptation. The first approach is based on the transfer of teacher tokens when teaching a student to neural network layers, for which an exponentially decreasing threshold of measuring the discrepancy between the probability distributions of the teacher and the student is reached. The second approach suggests reducing the number of parameters in a neural network by replacing fully connected layers with low-rank ones, which reduces the risk of overfitting and speeds up the learning process. The limitations of each method when working with long sequences are shown. It is proposed to combine methods to obtain an improved model of classical distillation of knowledge for long sequences. The use of a combined approach to distilling knowledge on long sequences made it possible to significantly compress the resulting model with a slight loss of quality as well as significantly reduce GPU memory consumption and response output time. Complementary approaches to optimizing the knowledge transfer process and model compression showed better results than selective teacher intervention in the student learning process and low-rank adaptation separately. Thus, the quality of answers of the improved classical knowledge distillation model on long sequences showed 97 % of the quality of full fine-tuning and 98 % of the quality of the low-rank adaptation method in terms of ROGUE-L and Perplexity, given that the number of trainable parameters is reduced by 99 % compared to full fine-tuning and by 49 % compared to low-rank adaptation. In addition, GPU memory usage is reduced by 75 % and 30 %, respectively, and inference time by 30 %. The proposed combination of knowledge distillation methods can find application in problems with limited computational resources.

Keywords

large language models, long sequences, neural networks, knowledge distillation, teacher model, student model, selective intervention in the learning process, low-rank adaptation

For citation: Tatarnikova T.M., Mokretsov N.S. Optimizing knowledge distillation models for language models. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2025, vol. 25, no. 4, pp. 737–743 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-4-737-743

Введение

Современные крупномасштабные языковые модели (Large Language Model, LLM) демонстрируют высокие результаты в различных задачах обработки естественного языка [1, 2]. Однако размеры таких моделей являются препятствием для их практического применения в условиях ограниченных объемов вычислительных ресурсов и памяти [3, 4]. По этой причине оптимизация использования ресурсов при работе с большими нейронными моделями представляет собой актуальную задачу.

В настоящее время, в качестве подхода для оптимизации модели нейронной сети, особое внимание уделяется идее дистилляции знаний. Суть данного подхода заключается в переносе знаний из точной, но громоздкой модели нейронной сети (учителя) в более компактную (ученика), с учетом ограничения вычислительных ресурсов или размеров чипа, на которых планируется запускать оптимизированную версию модели.

Для ускорения обучения языковых моделей при реализации дистилляции знаний предложены несколько методов, использующих выходные данные модели ученика (Student-Generated Outputs, SGO) [5]. Анализ источников [6, 7] показывает, что применение методов SGO приводит к уменьшению несоответствия между выводами при обучении и использовании модели, а также повышению производительности. Но такие заключения можно сделать относительно коротких последовательностей языковых моделей, для длинных последовательностей задача остается нерешенной. Этому есть несколько объяснений:

— методы SGO направлены на эффективное обучение модели ученика, поэтому необходимость точного ответа со стороны модели учителя часто игнорируется. Соответственно, ошибки при обучении, вызванные разрывом в размерах между моделями учителя и ученика, накапливаются в процессе обучения модели;
— эффект неточной передачи знаний: метод дистилляции знаний основан на предположении, что учитель предоставляет надежные данные, поэтому некорректное «руководство» со стороны модели учителя перерастает в серьезную проблему, при которой ученик получает высокие штрафы за правильные прогнозы и низкие за неправильные;
— авторегрессионная природа языковых моделей, которая способствует тому, что ошибки ученика могут накапливаться в длинных последовательностях.

Целью работы является исследование подходов к усовершенствованию классической дистилляции знаний для длинных последовательностей: стратегическое вмешательство модели учителя в процесс генерации последовательностей знаний учеником. При этом назначение модели учителя — эффективное обучение ученика и низкоранговая адаптация, назначение процесса генерации — повысить производительность обучения модели. Как ожидается комбинация этих подходов к дистилляции знаний на длинных последовательностях должна показать лучшие результаты.

Методы

Описание подхода дистилляции знаний. Идея дистилляции знаний заключается в передаче знаний от модели учителя к модели ученика без существенной потери точности результата. Обозначим:

— модель учителя:

$$T = p(y|x),$$

где x — входной набор данных для обучения; y — вывод модели учителя;

— модель ученика:

$$S = q(y|x),$$

процесс передачи знаний — дистилляция знаний:

$$£ = (p(y|x), q(y|x)).$$

Классическая дистилляция знаний заключается в том, что на выводе модели сравниваются «логиты» учителя и ученика при одних и тех же входных данных. Логит — логарифмическая функция, используемая для преобразования вероятности в линейный интервал [8]. Эти значения — токены — используются для предсказания класса объекта и обычно преобразуются в вероятности с помощью функции активации Softmax.

Целью обучения модели ученика является минимизация расхождения D между распределениями токенов моделей ученика и учителя, которое может быть оценено метрикой Дженсена–Шеннона (JSD) [9]:

$$JSD(p||q)(y|x) = \sum_{t=1}^{|y|} \sum_{y_t \in V} D(p||q)(y_t|y_{<t}, x),$$

где p и q — вероятностные распределения токенов для моделей учителя и ученика; y — целевая последовательность; x — запрос (входная последовательность); $y < t$ — подпоследовательность токенов до времени $(t - 1)$; V — словарь всех возможных токенов; $D(p||q)$ — мера расхождения между распределениями вероятностей токенов моделей учителя и ученика.

На рисунке приведена упрощенная схема дистилляции знаний.

Выборочное вмешательство учителя в процесс обучения ученика. Основная идея данного метода заключается в выборочном переключении между моделями ученика и учителя для генерации следующего токена при обнаружении значительных расхождений между их вероятностными распределениями. Такая стратегия позволяет сбалансировать необходимость обучения ученика на своих данных и необходимость предотвращения накопления ошибок в длинных последовательностях [10].

Для управления этим процессом применяется экспоненциально убывающий порог, который увеличивает участие учителя по мере продвижения последовательности, предотвращая ошибочное руководство в длинных последовательностях

$$\tau_t = \tau_0 e^{-\lambda t},$$

где τ_0 — начальный порог (установлен равным 1); λ — скорость убывания, контролирующая, насколько быстро порог уменьшается с течением времени.

Для определения момента вмешательства учителя также используется расхождение JSD, которое в этом случае предоставляет симметричную и ограниченную меру различия между двумя распределениями вероятностей [1]:

$$JSD(p||q) = \frac{1}{2} D_{KL}(p||m) + \frac{1}{2} D_{KL}(q||m),$$

где $m = \frac{1}{2}(p + q)$ — средние распределения; D_{KL} — KL-дивергенция (дивергенция Кульбака–Лейблера — мера расхождения между двумя вероятностными распределениями p и q, для которых $D_{KL}(p||q) \neq D_{KL}(q||p)$).

На каждом временном шаге t вычисляется JSD между распределениями ученика и учителя. Если расхождение превышает предопределенный порог τ_t, происходит переключение с модели ученика на модель учителя для генерации следующего токена.

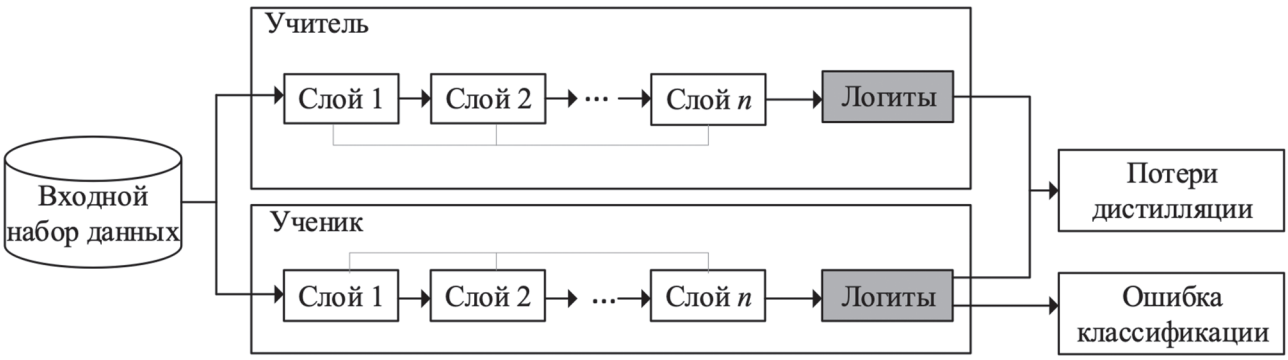


Рисунок. Архитектура дистилляции знаний

Figure. The architecture of knowledge distillation

Результаты и обсуждение

Качество метода выборочного вмешательства учителя в процесс обучения ученика (SwitchLLM) оценим по следующим метрикам:

— Recall-Oriented Understudy for Gisting Evaluation for Longest Common Subsequence (ROGUE-L) — качество обобщения текста, используется для оценки задач автоматического создания краткого содержания (заголовка, резюме, аннотации) исходного текста и сгенерированного текста [11]. Метрика измеряет наибольшую последовательность слов, которая встречается как в выходном тексте модели, так и в эталонном тексте, позволяя словам быть в любом порядке. Чем выше значение ROGUE-L, тем лучше совпадение.

$$ROGUE\text{-}L = \frac{\sum_{S} LCS(S, S')}{\sum_{S} \sum_{gram_n \in S} \text{len}(S)},$$

где LCS — длина наибольшей общей подпоследовательности между эталонным текстом S и текстом, который выдала модель S'; len(S) — длина эталонного текста S; $gram_n$ — последовательности длиною n символов (n-граммы).

— перплексия (Perplexity) — коэффициент неопределенности. Perplexity можно интерпретировать как обратную вероятность P предложения, нормированную на количество слов N. В основном используется обратная вероятность: меньшее значение Perplexity указывает на более высокую точность модели.

$$Perplexity = \sqrt[N]{\frac{1}{P(w_1, w_2, \ldots, w_N,)}},$$

где w_i — i-ое слово в предложении.

Предложения могут иметь разную длину, поэтому показатель не зависит от их размера.

Эксперимент проведен на бенчмарках Dolly и S-NI — базах эталонных задач для больших языковых моделей. Роль модели учителя выполняла вторая версия модели OpenLLaMA с 7 млрд параметров. Результаты метода SwitchLLM показаны в сравнении с методами SGO — MiniLLM и DistiLLM с таким же количеством параметров, как и для метода SwitchLLM, равным 3 млрд. Результаты методов дистилляции знаний и оценка дисперсии Var представлены в табл. 1.

Низкоранговая адаптация. Методы низкоранговой адаптации предназначены для эффективного дообучения больших языковых моделей с минимальными вычислительными затратами. Вместо того чтобы обновлять все параметры модели, как при полном дообучении, низкоранговая адаптация позволяет изменять лишь небольшую часть параметров, сохраняя большинство исходных весов модели фиксированными. Одна из популярных техник низкоранговой адаптации — метод Low-Rank Adaptation (LoRA), который уменьшает количество обучаемых параметров за счет введения небольших матриц разложения ранга, сохраняя при этом производительность, сравнимую с полной донастройкой во многих задачах [12].

Метод LoRA включает следующие этапы.

Этап 1. Выбирается предварительно обученная матрица весов **W0**.

Предварительно обученная матрица весов **W0** имеет размер $d \times k$.

Этап 2. Низкоранговая декомпозиция.

Обновление весов **ΔW** в матрице **W0** представляется в виде произведения двух матриц **B** и **A** низкого ранга размерностями $d \times r$ и $r \times k$.

Ранг r намного меньше рангов d и k, что обеспечивает более эффективное в вычислительном отношении представление.

Этап 3. Обучение.

В процессе обучения матрица **W0** остается неизменной — происходит «замораживание» весов.

Таблица 1. Оценки ROGUE-L и Perplexity различных методов дистилляции знаний

Table 1. ROGUE-L and Perplexity assessments of various knowledge distillation methods

Метрика	Бенчмарк	Оценки	Метод (число параметров, млрд)			
			OpenLLaMA2 (7)	MiniLLM (3)	DistiLLM (3)	SwitchLLM (3)
ROGUE-L	Dolly	LCS ∈ [1; 10]	28,80	27,40	28,30	28,60
		LCS ∈ [11; 20]	16,60	16,50	20,20	26,50
		Var	0,77	0,82	0,82	0,80
	S-NI	LCS ∈ [1; 10]	34,80	35,40	35,10	36,10
		LCS ∈ [11; 20]	29,70	28,80	21,60	31,30
		Var	0,79	0,84	0,85	0,83
Perplexity	Dolly	$N = 10$	3,68	3,99	3,77	3,68
		$N = 20$	3,70	4,00	4,00	3,70
		Var	0,11	0,41	0,37	0,32
	S-NI	$N = 10$	3,69	3,99	3,78	3,70
		$N = 20$	3,70	4,10	4,10	3,90
		Var	0,12	0,41	0,37	0,33

A и **B** являются обучаемыми параметрами — в них вносятся корректировки.

Этап 4. Умножение и сложение.

Предварительно обученная матрица весов **W0** и матрица обновлений **ΔW**, которая является продуктом **B** и **A**, умножаются на один и тот же вход **x**. Результаты этих умножений складываются

$$\mathbf{h} = \mathbf{W0x} + \mathbf{\Delta Wx} = \mathbf{W0x} + \mathbf{BAx},$$

где **h** — результат после применения обновлений к входу **x**.

Как видно, метод LoRA позволяет более эффективно обновлять матрицу больших весов, представляя обновления с использованием разложения низкого ранга, что сказывается на эффективности вычислений и использовании памяти.

Предлагаемое решение — комбинация выборочного вмешательства учителя в процесс обучения ученика и низкоранговой адаптации. Процесс начинается с выбора и донастройки модели учителя для поставленной задачи, где функция потерь выглядит следующим образом:

$$£^{P}_{task} = \frac{1}{|D_{task}|} \sum_{(x_i y_i \in D_{task}} £_{CE}(P(x_i) y_i),$$

где $£_{CE}$ — функция потерь перекрестной энтропии (Cross-Entropy loss), которая измеряет расхождение между предсказанными вероятностями $P(x_i)$ и метками y_i; x_i — входные данные; y_i — метки для входных данных; D_{task} — обучающий набор данных.

Затем инициализируется более компактная модель ученика из того же семейства моделей, в которую интегрируются модули LoRA. Эти модули внедряются в слои **A** и **B** модели, где матрицы весов для модели ученика q и значений весов v декомпозируются на предобученные веса и низкоранговые матрицы:

$$W_q = W_q^{base} + A_q B_q,\ W_v = W_v^{base} + A_v B_v,$$

где W_q^{base}, W_v^{base} — предобученные веса модели ученика; A_q, B_q, A_v, B_v — низкоранговые матрицы, которые являются обучаемыми параметрами.

Функция потерь для модели ученика комбинирует две компоненты: задачу минимизации ошибки на целевой задаче и задачу минимизации расхождения между выходами учителя и ученика. В результате общая функция потерь имеет вид:

$$£^{s}_{total} = \alpha £^{P}_{task} + (1 - \alpha) £_{KD}(z^s, z^t),$$

где α — весовой коэффициент; $£^{P}_{task}$ — функция потерь на целевой задаче, аналогичная модели ученика; $£_{KD}$ — функция потерь для дистилляции знаний.

Для подбора весового коэффициента a использовалась библиотека Optuna, суть которой заключается в обучении вариаций моделей с различными весовыми коэффициентами и получением наилучшего из них.

Функция потерь для общего метода дистилляции знаний представляет собой расхождение между выходами учителя и ученика и измеряется через KL-дивергенцию:

$$£_{KD}(z^s, z^t) = D_{KL}(p^s || p^t),$$

где z^s, z^t — значения слоя Softmax моделей ученика и учителя; p^s, p^t — распределение вероятностей, предсказанное моделями ученика и учителя; D_{KL} — KL-дивергенция.

На этапе дистилляции знаний модель ученик обучается под руководством модели учителя, при этом обновляются только низкоранговые матрицы **A** и **B** метода LoRA. Функция потерь комбинирует задачу минимизации расхождения между выходами учителя и ученика (измеряемого через KL-дивергенцию) и задачу минимизации ошибки на целевой задаче. Параметр α управляет балансом между этими двумя компонентами.

Для оценки SwitchLLM-LoRA проводился следующий эксперимент:

— в качестве моделей учителей выбраны популярные модели BERT, RoBERTa и DeBERTaV3 [13, 14];
— моделями учениками выбраны компактные модели, которые принадлежат к тому же семейству, что и их более крупные модели учителя, в частности, для BERT-base, DeBERTa-v3-base и RoBERTa-base соответственно;

Таблица 2. Сравнение методов FFT, LoRA и SwitchLLM-LoRA
Table 2. Comparison of FFT, LoRA, and SwitchLLM-LoRA methods

Модель учителя	Модель ученика	Метод	Числопараметров, млн	Память GPU, МБ	Время вывода, с
BERT-base	DistilBERT-base	FFT	110	1322,0	6,10
		LoRA	2,9	463,5	6,22
		SwitchLLM-LoRA	**1,2**	**296,8**	**5,36**
RoBERTa-base	DistilRoBERTa-base	FFT	125	1515,9	7,21
		LoRA	2,9	531,9	7,19
		SwitchLLM-LoRA	**1,2**	**358,3**	**4,44**
DeBERTa-v3-base	DeBERTa-v3-small	FFT	183	2234,5	14,37
		LoRA	2,9	763,4	15,62
		SwitchLLM-LoRA	**1,5**	**590,3**	**10,38**

Примечание. Жирным шрифтом выделены результаты предложенного метода.

— сравнительных анализ проведен между тремя методами донастройки этих моделей: полная донастройка (full fine-tune, FFT), LoRA и SwitchLLM-LoRA;
— оценки качества моделей проведена на бенчмарке GLUE, который представляет собой набор из 9 задач по обработке естественного языка, предназначенных для оценки эффективности моделей в широком спектре задач, связанных с пониманием языка. Эти задачи включают в себя логику, анализ тональности, сходство текстов и многое другое. Бенчмарк GLUE является своего рода стандартом для сравнения способностей моделей понимать и обрабатывать текст. Результаты эксперимента приведены в табл. 2.

Заключение

Показано, что выборочное вмешательство учителя в процесс обучения ученика превосходит прочие современные методы дистилляции знаний, использующих выходные данные модели ученика по метрике ROGUE-L, что подчеркивается важность вмешательства учителя при обучении ученика, вместо того чтобы полагаться только на выходные данные, сгенерированные учеником. Это указывает на то, что данный метод эффективно сокращает разрыв между моделями ученика и учителя, особенно когда количество параметров модели ученика значительно ниже, чем у модели учителя.

Подходы к усовершенствованию классической дистилляции знаний, рассмотренные в работе, демонстрируют потенциал в решении проблемы эффективного использования ресурсов при работе с большими языковыми моделями, но при этом имеют определенные ограничения. Метод выборочного вмешательство учителя в процесс обучения ученика способствует улучшению качества генерации последовательностей, метод низкоранговой адаптации способствует оптимизации использования параметров и снижении требований к памяти.

Поскольку рассмотренные методы усовершенствования классической дистилляции знаний предлагают различные, но взаимодополняющие подходы к оптимизации процесса передачи знаний и сжатия моделей, то их комбинация показала лучшие результаты: показатели ответов модели SwitchLLM-LoRA достигают 97 % качества FFT и 98 % качества LoRA по показателям ROGUE-L и Perplexity, при учете того, что количество обучаемых параметров снижается на 99 % по сравнению с FFT и на 49 % в сравнении с LoRA. Кроме того, использование памяти GPU уменьшается на 75 % и 30 % по сравнению с FFT и LoRA соответственно, а время вывода ответа на 30 %.

Литература

1. Дудихин В.В., Кондрашов П.Е. Методология использования больших языковых моделей для решения задач государственного и муниципального управления по интеллектуальному реферированию и автоматическому формированию текстового контента // Государственное управление. Электронный вестник. 2024. № 105. С. 169–179. https://doi.org/10.55959/MSU2070-1381-105-2024-169-179
2. Кузнецов А.В. Цифровая история и искусственный интеллект: перспективы и риски применения больших языковых моделей // Новые информационные технологии в образовании и науке. 2022. № 5. С. 53–57. https://doi.org/10.17853/2587-6910-2022-05-53-57
3. Мокрецов Н.С., Татарникова Т.М. Алгоритм оптимизации моделей нейронных сетей для обработки текста на естественном языке // Прикладной искусственный интеллект: перспективы и риски: Сборник докладов Международной научной конференции. 2024. С. 280–282.
4. Houlsby N., Giurgiu A., Jastrzebski S., Morrone B., Laroussilhe Q., Gesmundo A., Attariyan M., Gelly S. Parameter-efficient transfer learning for NLP // Proc. of the 36th International Conference on Machine Learning. 2019. V. 97. P. 2790–2799.
5. Liao B., Meng Y., Monz C. Parameter-efficient fine-tuning without introducing new latency // Proc. of the 61st Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics. 2023. V. 1. P. 4242–4260. https://doi.org/10.18653/v1/2023.acl-long.233
6. Lv K., Yang Y., Liu T., Guo Q., Qiu X. Full parameter fine-tuning for large language models with limited resources // Proc. of the 62nd Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics. 2024. V. 1. P. 8187–8198. https://doi.org/10.18653/v1/2024.acl-long.445
7. Khurana A., Subramonyam H., Chilana P.K. Why and when LLM-based assistants can go wrong: investigating the effectiveness of prompt-based interactions for software help-seeking // Proc. of the 29th International Conference on Intelligent User Interfaces. 2024. P. 288–303. https://doi.org/10.1145/3640543.3645200
8. Мокрецов Н.С., Татарникова Т.М. Оптимизация процесса обучения при ограниченном объеме вычислительных ресурсов // Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям. 2024. Т. 1. С. 205–208.

References

1. Dudikhin V.V., Kondrashov P.E. Methodology of using large language models to solve tasks of State and municipal government for intelligent abstracting and automatic generation of text content. *E-journal Public Administration*, 2024, no. 105, pp. 169–179. (in Russian). https://doi.org/10.55959/MSU2070-1381-105-2024-169-179
2. Kuznetsov A.V. Digital history and artificial intelligence: perspectives and risks of pretrained language models. *New Information Technologies in Education and Science*, 2022, no. 5, pp. 53–57. (in Russian). https://doi.org/10.17853/2587-6910-2022-05-53-57
3. Mokretsov N.S., Tatarnikova T.M. Algorithm for optimizing neural network models for natural language text processing. *Proc. of the Applied Artificial Intelligence: Prospects and Risks*, 2024. pp. 280–282. (in Russian)
4. Houlsby N., Giurgiu A., Jastrzebski S., Morrone B., Laroussilhe Q., Gesmundo A., Attariyan M., Gelly S. Parameter-efficient transfer learning for NLP. *Proc. of the 36th International Conference on Machine Learning*, 2019. vol. 97, pp. 2790–2799.
5. Liao B., Meng Y., Monz C. Parameter-efficient fine-tuning without introducing new latency. *Proc. of the 61st Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics*, 2023, vol. 1, pp. 4242–4260. https://doi.org/10.18653/v1/2023.acl-long.233
6. Lv K., Yang Y., Liu T., Guo Q., Qiu X. Full parameter fine-tuning for large language models with limited resources. *Proc. of the 62nd Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics*, 2024, vol. 1, pp. 8187–8198. https://doi.org/10.18653/v1/2024.acl-long.445
7. Khurana A., Subramonyam H., Chilana P.K. Why and when LLM-based assistants can go wrong: investigating the effectiveness of prompt-based interactions for software help-seeking. *Proc. of the 29th International Conference on Intelligent User Interfaces*, 2024, pp. 288–303. https://doi.org/10.1145/3640543.3645200
8. Mokretsov N.S., Tatarnikova T.M. Optimizing the learning process with limited computational resources. *Proc. of the International Conference on Soft Computing and Measurement*, 2024, vol. 1, pp. 205–208. (in Russian)
9. Ouyang L., Wu J., Jiang X., Almeida D., Wainwright C., Mishkin P., Zhang C., Agarwal S., Slama K., Ray A., et al. Training language models to follow instructions with human feedback. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 2022, vol. 35, pp. 27730–27744.

9. Ouyang L., Wu J., Jiang X., Almeida D., Wainwright C., Mishkin P., Zhang C., Agarwal S., Slama K., Ray A., et al. Training language models to follow instructions with human feedback // Advances in Neural Information Processing Systems. 2022. V. 35. P. 27730–27744.
10. Borgeaud S., Mensch A., Hoffmann J., Cai T., Rutherford E., Millican K., et al. Improving language models by retrieving from trillions of tokens // Proc. of the 39th International Conference on Machine Learning. 2022. P. 2206–2240.
11. Белякова А.Ю., Беляков Ю.Д. Обзор задачи автоматической суммаризации текста // Инженерный вестник Дона. 2020. № 10 (70). С. 142–159.
12. Швыров В.В., Капустин Д.А., Кущенко А.В., Сентяй Р.Н. Дообучение больших языковых моделей с использованием техники LoRA для решения задач статического анализа программного кода // Вестник Луганского государственного университета имени Владимира Даля. 2023. № 12 (78). С. 210–215.
13. Liu Z., Lin W., Shi Y., Zhao J. A robustly optimized BERT pre-training approach with post-training // Lecture Notes in Computer Science. 2021. V. 12869. P. 471–484. https://doi.org/10.1007/978-3-030-84186-7_31
14. Jiao X., Yin Y., Shang L., Jiang X., Chen X., Li L., Wang F., Liu Q. TinyBERT: distilling BERT for natural language understanding // Findings of the Association for Computational Linguistics: EMNLP. 2020. P. 4163–4174. https://doi.org/10.18653/v1/2020.findings-emnlp.372

10. Borgeaud S., Mensch A., Hoffmann J., Cai T., Rutherford E., Millican K., et al. Improving language models by retrieving from trillions of tokens. *Proc. of the 39th International Conference on Machine Learning*, 2022, pp. 2206–2240.
11. Belyakova A.Y., Belyakov Y.D. Overview of text summarization methods. *Ingineering Journal of Don*, 2020, no. 10 (70), pp. 142–159 (in Russian)
12. Shvyrov V.V., Kapustin D.A., Kushchenko A.V., Sentyay R.N. Large language models fine-tuning with the LoRA technique to solve problems of static analysis of program code. *Vestnik of the Lugansk Vladimir Dahl National University*, 2023, no. 12 (78), pp. 210–215. (in Russian)
13. Liu Z., Lin W., Shi Y., Zhao J. A robustly optimized BERT pre-training approach with post-training. *Lecture Notes in Computer Science*, 2021, vol. 12869, pp. 471–484. https://doi.org/10.1007/978-3-030-84186-7_31
14. Jiao X., Yin Y., Shang L., Jiang X., Chen X., Li L., Wang F., Liu Q. TinyBERT: distilling BERT for natural language understanding. *Findings of the Association for Computational Linguistics: EMNLP*, 2020, pp. 4163–4174. https://doi.org/10.18653/v1/2020.findings-emnlp.372

Авторы

Татарникова Татьяна Михайловна — доктор технических наук, профессор, директор института информационных технологий и программирования, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, 190000, Российская Федерация, SC 36715607400, https://orcid.org/0000-0002-6419-0072, Tm-tatarn@yandex.ru

Мокрецов Никита Сергеевич — аспирант, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, 197022, Российская Федерация, SC 57821230900, https://orcid.org/0009-0009-1399-8504, mokrecovnikita6374@gmail.com

Authors

Tatiana M. Tatarnikova — D.Sc., Professor, Director of the Institute of Information Technologies and Programming, Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation (SUAI), Saint Petersburg, 190000, Russian Federation, SC 36715607400, https://orcid.org/0000-0002-6419-0072, Tm-tatarn@yandex.ru

Nikita S. Mokretsov — PhD Student, Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", Saint Petersburg, 197022, Russian Federation, SC 57821230900, https://orcid.org/0009-0009-1399-8504, mokrecovnikita6374@gmail.com

Статья поступила в редакцию 25.03.2025
Одобрена после рецензирования 20.06.2025
Принята к печати 23.07.2025

Received 25.03.2025
Approved after reviewing 20.06.2025
Accepted 23.07.2025

Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ
июль–август 2025 Том 25 № 4 http://ntv.ifmo.ru/
SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL OF INFORMATION TECHNOLOGIES, MECHANICS AND OPTICS
Jule–August 2025 Vol. 25 No 4 http://ntv.ifmo.ru/en/
ISSN 2226-1494 (print) ISSN 2500-0373 (online)

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ

doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-4-744-754
УДК 004.514, 004.896

Алгоритм взаимодействия человека с моделью индустриальной киберфизической системы посредством нейроинтерфейса

Михаил Сергеевич Сизов[1], Мария Яковлевна Марусина[2]✉, Кирилл Васильевич Киприянов[3], Валерий Александрович Архипов[4], Цзячэн Лоу[5], Жанна Владимировна Нагорнова[6], Наталья Вячеславовна Шемякина[7]

[1,2,3,4,5] Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация
[6,7] Институт эволюционной физиологии и биохимии имени И.М. Сеченова РАН, Санкт-Петербург, 194223, Российская Федерация

[1] mssizov@gmail.com, https://orcid.org/0009-0003-4562-7675
[2] myamarusina@itmo.ru✉, https://orcid.org/0000-0002-5611-8812
[3] kvkipriianov@itmo.ru, https://orcid.org/0000-0003-0155-6900
[4] valery.arckhipov@itmo.ru, https://orcid.org/0009-0006-8319-653X
[5] 623619178@qq.com, https://orcid.org/0009-0009-1026-6834
[6] nagornova_zh@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-6476-3141
[7] shemyakina_n@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-8936-0082

Аннотация

Введение. Предложен алгоритм реализации интерфейса мозг-компьютер для осуществления взаимодействия человека с моделью индустриальной киберфизической системы. Интерфейс обеспечивает выбор задуманной детали на основе классификации вызванного ответа электроэнцефалограммы испытуемого на предъявление зрительных стимулов (изображений деталей). **Метод.** Для проведения исследования был разработан программный комплекс, система управления которого состоит из веб-сервера, контроллера и пользовательского интерфейса мозг-компьютер. Биоэлектрическая активность мозга испытуемого непрерывно регистрировалась с использованием электроэнцефалографа ООО «Мицар», далее с помощью разработанного оригинального программного обеспечения проводилась обработка электроэнцефалографических сигналов в онлайн-режиме. Проведена классификация накопленных вызванных потенциалов на стимул различными способами: выбором на основании амплитудных значений, использованием метода опорных векторов и нейронной сетью. **Основные результаты.** Показано, что точности классификации вызванных потенциалов при помощи нейронной сети и метода опорных векторов примерно равны и данные алгоритмы могут быть реализованы в режиме реального времени (онлайн). Анализ проведенных экспериментов доказал, что предложенный алгоритм позволяет классифицировать предъявляемые зрительные стимулы в нейроинтерфейсах в онлайн-режиме. **Обсуждение.** Результаты работы продемонстрировали возможность организации «глубоко интегрированного» взаимодействия человека с оборудованием, посредством воздействия команд, сформированных на основе обработанных сигналов биоэлектрической активности мозга человека на 3D-модель производственного участка.

Ключевые слова

киберфизическая система, электроэнцефалографические сигналы, вызванный потенциал, нейроинтерфейс/ИМК/BCI

Ссылка для цитирования: Сизов М.С., Марусина М.Я., Киприянов К.В., Архипов В.А., Лоу Ц., Нагорнова Ж.В., Шемякина Н.В. Алгоритм взаимодействия человека с моделью индустриальной киберфизической системы посредством нейроинтерфейса // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2025. Т. 25, № 4. С. 744–754. doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-4-744-754

© Сизов М.С., Марусина М.Я., Киприянов К.В., Архипов В.А., Лоу Ц., Нагорнова Ж.В., Шемякина Н.В., 2025

Algorithm for human interaction with a model of an industrial cyber-physical system by means of neural interface

Mihail S. Sizov[1], Maria Ya. Marusina[2]✉, Kirill V. Kipriianov[3], Valery A. Arckhipov[4], Jiacheng Lou[5], Zhanna V. Nagornova[6], Natalia V. Shemyakina[7]

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

[6,7] Sechenov Institute of Evolutionary Physiology and Biochemistry of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, 194223, Russian Federation

[1] mssizov@gmail.com, https://orcid.org/0009-0003-4562-7675

[2] myamarusina@itmo.ru✉, https://orcid.org/0000-0002-5611-8812

[3] kvkipriianov@itmo.ru, https://orcid.org/0000-0003-0155-6900

[4] valery.arckhipov@itmo.ru, https://orcid.org/0009-0006-8319-653X

[5] 623619178@qq.com, https://orcid.org/0009-0009-1026-6834

[6] nagornova_zh@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-6476-3141

[7] shemyakina_n@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-8936-0082

Abstract

The article proposes an algorithm of a Brain Computer Interface (BCI) for implementation of interaction between a human and a model of an industrial cyberphysical system. The interface facilitates selecting a conceived tool on the basis of the classification of evoked responses of a test person's encephalogram to visual stimuli (tool images). To conduct the study there has been designed a software system operated with a web-server, a controller, and a user BCI. The cerebral bioelectrical activity of a test person has been constantly registered with the encephalograph produced by LLC MITSAR followed by online signal processing conducted by the designed original software system. The stored evoked responses to stimuli have been classified in a variety of ways — peak-based selection, a support vector machine, and a neural net. There has been proved that accuracy of the classification of evoked potentials both with the help of a neural net and a support vector machine are approximately equal and these algorithms can be implemented in the online mode. Analysis of the experiments performed has shown that the proposed algorithm makes it possible to classify presented visual stimuli in neural interfaces in the online mode. The results show how it is possible to organize a 'deeply integrated' interaction between a human and an equipment through an impact of commands based on the processed signals of bioelectrical brain activity of a human on a 3D model of a production site.

Keywords

cyber-physical system (CPS), EEG signals, evoked potential, neural interface, BCI

For citation: Sizov M.S., Marusina M.Y., Kipriianov K.V., Arckhipov V.A., Lou J., Nagornova Zh.V., Shemyakina N.V. Algorithm for human interaction with a model of an industrial cyber-physical system by means of neural interface. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2025, vol. 25, no. 4, pp. 744–754 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-4-744-754

Введение

Технологии цифрового производства усовершенствовали производственные бизнес-модели и операционные технологии. Одним из ключевых компонентов цифрового производства стали индустриальные киберфизические системы (ИКФС), обеспечивающие интеллектуальное принятие решений и более высокую персонализацию производимых продуктов и услуг.

Однако стоит отметить, что совершенствование исключительно коммуникационных и операционных технологий, а также производственного оборудования не позволят достигнуть следующего перехода к интеллектуальному производству — необходимо обратить внимание на человека, следует «вернуть» его в производство, поскольку именно люди представляют собой самую гибкую часть ИКФС [1]. Взаимодействие человека с оборудованием выходит на новый уровень, например, виртуальная или дополненная реальности создают новую интеграцию людей с цифровыми интерфейсами и оцифрованными активами [2–4].

Ведутся исследования в области развития человеко-центричных систем, в которых люди интерактивно взаимодействуют с «интеллектуальным» оборудованием, используя человеко-машинные интерфейсы. Такой подход приведет к радикальным изменениям в производстве, а также в инженерно-конструкторской, технологической и прочей деятельности [5–7].

В отличие от ИКФС, фокусирующихся на совершенствовании оборудования, технологий и автоматизации, человеко-центричные производственные системы фокусируются на глобальной экологической и энергетической устойчивости и умной трансформации методов, ориентированных на человека, для развития творчества и синергии. Одним из инструментов общения может стать эмоциональный интеллект [8–11]. Для обмена актуальными данными между человеком и оборудованием используются неинвазивные нейроинтерфейсы (Brain-Computer Interface, BCI), позволяющие получить данные о нейронной активности мозга человека. Полученные данные распознаются и преобразуются в команды управления внешними устройствами (персональный компьютер, робот, экзоскелет и пр.) или программными системами [10, 12–15].

Приведем краткий обзор исследований взаимодействия человека с окружающей средой посредством BCI, являющихся основой для настоящей работы. В [16] описана реконструкция (генерация) 3D-объектов, основанная на обработке электроэнцефалографических (ЭЭГ) сигналов. Для реконструкции 3D-объектов из данных ЭЭГ извлекались и классифицировались семантические признаки, генерировались сложные ви-

зуальные образы: цвет, форма, структура и прочая информация, необходимая для воссоздания 3D-объектов. В [17] исследованы проблемы интерпретации неспецифичных ЭЭГ-сигналов, вызванные, например, низким уровнем концентрации испытуемого или его высокой умственной нагрузкой. Отмечено, что задачи 3D-взаимодействия сложнее для пользователей, чем взаимодействие с 2D-средой, поскольку требуют больших когнитивных усилий. Работа [18] посвящена управлению роботом Sphero RVR с помощью ЭЭГ-сигналов. Триггером для начала движения робота являлось сжатие челюстей испытуемого, а при расслаблении челюстей робот останавливался. Было распознано 100 % сжимание челюстей, однако пропущены несколько состояний расслабления, время обработки ЭЭГ-сигналов и передачи команд составляло порядка 150 мс. В [19] представлен опыт взаимодействия пользователя с системой автоматизированного проектирования (САПР) на основе его интуитивных действий и ощущений, например, при выборе объекта взглядом. Для повышения точности распознавания объектов использовался анализ ЭЭГ дополнительных (внешних) сигналов, позволяющий различить намерения пользователя при выборе объекта взглядом. В [20] рассмотрены схемы взаимодействия людей с коллаборативными роботами на основе оценки полученных ЭЭГ-сигналов, при анализе возникающих реакций человека применялись алгоритмы обучения с подкреплением.

В настоящей работе представлена реализация человеко-центричного подхода на примере взаимодействия человека-оператора с ресурсами производственного складского участка. Цель исследования — разработать алгоритм взаимодействия человека с моделью ИКФС в онлайн-режиме.

Материалы и методы

Описание исследования. Эксперимент состоял из следующих этапов.

Этап 1. На испытуемого, имитирующего роль оператора станка, надевался шлем с электродами для регистрации ЭЭГ-сигналов. Испытуемый совершал следующие действия: смотрел на экран дисплея, на котором появлялась матрица 3D-изображений деталей, и из предложенных деталей задумывал/выбирал необходимую деталь; затем на экране дисплея периодически подсвечивался случайный столбец или строка матрицы деталей, а испытуемый концентрировался на задуманной/выбранной детали.

Этап 2. Мозговая активность испытуемого регистрировалась с помощью 32-канального электроэнцефалографа ООО «Мицар» (Санкт-Петербург, Россия).

Этап 3. Посредством специализированного программного пакета[1] осуществлялась предобработка ЭЭГ-сигналов, запись данных в файлы и дальнейшая графическая визуализация данных по всем каналам.

Этап 4. Данные ЭЭГ обрабатывались с помощью разработанного оригинального программного обеспечения (в среде Python) и определялась задуманная деталь.

Этап 5. Осуществлялся поиск задуманной детали на складском участке.

Этап 6. На основе информации о местонахождении детали определялись параметры действий складского робота, которые далее передавались в управляющую программу робота. Для проведения эксперимента были созданы 3D-модели складского участка с управляемыми полками для хранения деталей и складского робота. Команды для управления роботом передавались в 3D-модель.

Этап 7. Робот брал задуманную деталь из ящика и переносил ее на складской столик для последующей транспортировки к рабочему месту оператора станка.

Программный комплекс. Для проведения исследования был разработан программный комплекс, структура которого представлена на рис. 1. Компоненты сгруппированы по решаемым задачам.

Система управления, приведенная на рис. 2, состоит из трех больших элементов: веб-сервера (WebService), контроллера (Controller) и пользовательского интерфейса (UI).

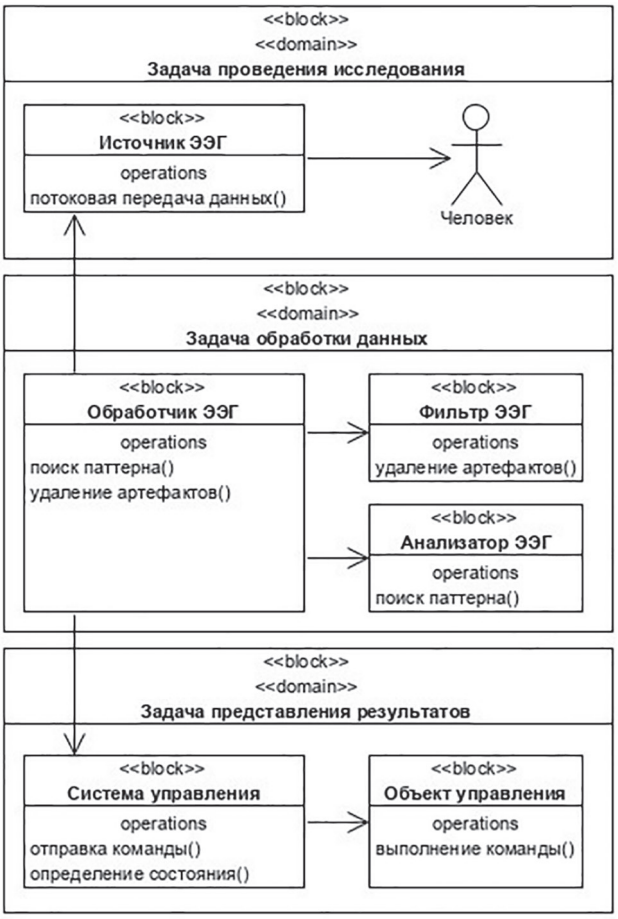


Рис. 1. Состав разработанного программного комплекса. ЭЭГ — электроэнцефалография

Fig. 1. Composition of the developed software complex. ЭЭГ — electroencephalography

[1] Пономарев В.А., Кропотов Ю.Д. Программа для ЭВМ, WinEEG, свидетельство о государственной регистрации № 2001610516 от 08.05.2001.

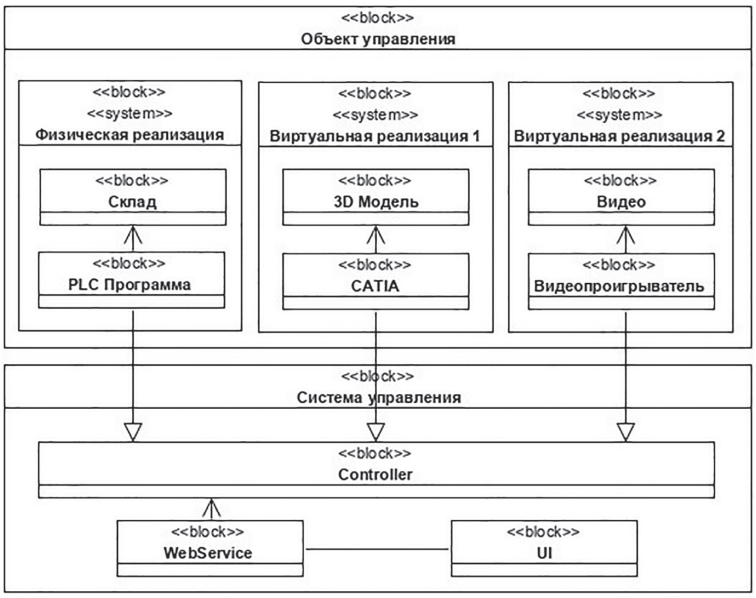


Рис. 2. Структура системы управления.
PLC – контроллер с программируемой логикой; CATIA — программный пакет для 3D-проектирования

Fig. 2. Structure of the control system.
PLC – programmable logic controller; CATIA – 3D design software package

Были рассмотрены две виртуальные реализации, «физическая» реализация планируется для дальнейшей разработки.

В виртуальной реализации 1 в качестве объекта управления использовалась 3D-модель складской системы, а в качестве контроллера — система 3D-моделирования. В виртуальной реализации 2 применены предзаписанные видеофайлы и видеоплеер. Видеофайлы были получены в результате работы с 3D-моделью склада. Применение видеозаписей позволило снизить требования к персональному компьютеру, на котором осуществлялась симуляция. Для проведения исследования выбрана виртуальная реализация 2.

Принцип работы системы управления представлен на рис. 3. При помощи программного интерфейса приложения (Application Programming Interface, API) происходит обмен данными между приложениями через сервер.

API создается с помощью протокола HTTP. Такой способ создания API называется REST (Representational State Transfer), на русском его называют «передачей состояния представления».

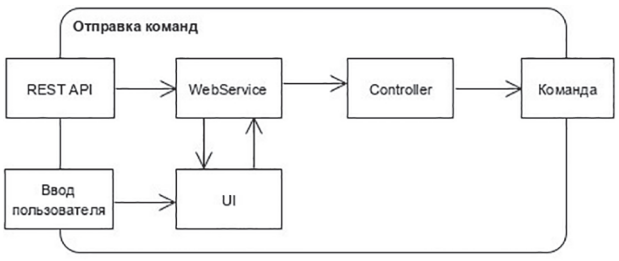


Рис. 3. Схема отправки команд объекту управления
Fig. 3. Schema of sending commands to the control object

В настоящее время это самый распространенный способ организации API. Технологию REST API применяют везде, где пользователю сайта или веб-приложения нужно предоставить данные с сервера.

С помощью REST API отправляются запросы на выполнение соответствующих команд объектом управления. Для удобства оператора отдельно сделан графический интерфейс, выступающий в качестве инструмента для облегчения формирования запросов.

Разработанная система управления является расширяемой, благодаря выделению логики управления в отдельный элемент — контроллер «Controller». При дальнейшем расширении необходимо только реализовать Controller для соответствующей предметной области. Программный код доступен по ссылке[1].

Предъявление стимулов и регистрация ЭЭГ. В ответ на предъявление зрительного стимула мозг испытуемого генерирует «ответные» биоэлектрические сигналы (вызванные потенциалы (ВП)), выделяемые при многократном накоплении и усреднении. ВП при направленном/осознанном внимании на целевой стимул отличаются большей амплитудой во временном окне 280–420 мс [15] по сравнению с реакцией на нецелевой стимул. В настоящей работе окно интереса было шире — 250–550 мс — для выявления типичной реакции на целевой зрительный стимул (подсветка задуманной/выбранной детали) в сравнении с нецелевыми стимулами (подсветка других деталей). С помощью классификации единичных ЭЭГ-сигналов или при минимальном количестве усреднений (5 усреднений) мож-

[1] Программный код проекта WarehouseSimulator [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://github.com/kinnder/warehouseSimulator (дата обращения: 16.07.2025).

но определить целевой зрительный стимул и соотнести его с задуманной деталью.

Для предъявления зрительных стимулов в программе Psytask была составлена матрица из 25 ячеек (5 × 5). В каждой ячейке находилось 3D-изображение детали. Перед исследованием испытуемому давалась инструкция — сообщалось какую одну из представленных на экране дисплея деталей (которая ему необходима для обработки и соответствующей поставки со склада на его рабочее место) он должен задумать. Деталь для каждой сессии исследования выбиралась случайным образом, так как алгоритм должен корректно классифицировать любую из рассматриваемых деталей. Помимо этого, испытуемому объяснялось дополнительное действие (реакция), которое он должен был совершить в ответ на подсветку задуманной детали, чтобы зарегистрировать реакцию ВП на целевой стимул.

Реакция 1. Мысленный подсчет количества «подсветок» задуманной детали (точность подсчета не учитывалась, фиксировалось изменение реакции на целевой стимул).

Реакция 2. Нажатие на физическую кнопку (кнопка не была подключена, служила для запуска моторной реакции на целевой стимул).

Реакция 3. Нажатие на воображаемую кнопку (аналогично реакции 2 фиксируется напряжение пальцев, как если бы кнопка была).

Для каждого испытуемого были записаны все три реакции, каждая — при выборе нескольких различных деталей.

В ходе исследования в случайном порядке подсвечивалась одна строка (горизонтальный зрительный стимул) или один столбец (вертикальный зрительный стимул) матрицы деталей (рис. 4). В каждой сессии испытуемый сначала задумывал деталь, после чего исследование длилось около 120 с, а испытуемый концентрировался на выбранной детали и при подсветке ячейки, содержащей задуманную деталь, вызывал у себя одну из реакций 1–3.

Для выбора одной детали предъявлялось по 5 горизонтальных и вертикальных зрительных стимулов. Предъявление стимулов было организовано в пробы длительностью 400 мс: в каждой пробе на 100-й мс предъявлялся стимул — подсветка строки или столбца, длительность подсветки равнялась 60 мс, межпробный интервал варьировался в диапазоне 60–100 мс. Если задуманная деталь оказывалась в подсвеченном стимуле, он считался целевым стимулом и испытуемый дополнительно реагировал на него одной из реакций. Амплитуда ВП при реакции на целевой стимул выше, чем на нецелевой стимул с максимумом около 300 мс (компонент P300).

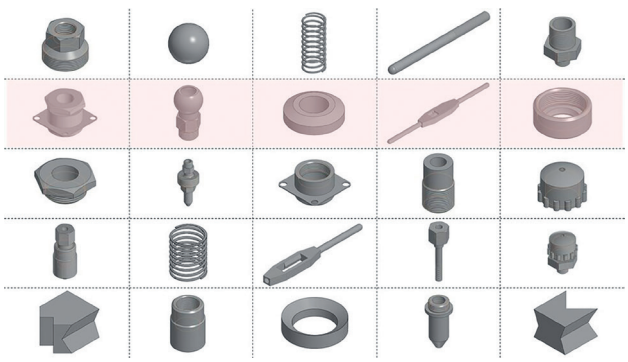


Рис. 4. Матрица деталей с подсвеченной строкой (стимулом)

Fig. 4. Parts matrix with illuminated row (stimulus)

Биоэлектрическая активность мозга испытуемого непрерывно регистрировалась с помощью многоканального электроэнцефалографа «Мицар»[1], регистрирующие электроды располагались на поверхности головы по системе 10–20, частота дискретизации 500 Гц, фильтрация сигнала в полосе 0,5–30 Гц, режекторный фильтр 50 Гц. Регистрация проводилась монополярно, относительно объединенного ушного электрода, электрод «земля» располагался в передне-центральном отведении (между Fz и Fpz). Так как в исследовании испытуемый работал со зрительными стимулами в парадигме вызванных потенциалов – был выполнен анализ ЭЭГ/ВП-сигналов зрительной коры головного мозга и осуществлена запись ЭЭГ от двух электродов: Pz и Oz. Однако в дальнейшем набор электродов может быть расширен, например, для проведения анализа сигналов моторной коры или для удаления артефактов. В настоящем исследовании с двумя выбранными электродами, влияние артефактов было незначительно, так как сигнал регистрировался вдали от основных источников шума, вызываемого глазодвигательными артефактами [21].

Анализ ЭЭГ. Для выявления задуманной детали производилась классификация ЭЭГ/ВП-сигналов, цель которой состояла в определении: находилась ли в подсвеченном стимуле задуманная деталь или нет. Классификация производилась по результатам анализа ВП в ответ на предъявление стимула [22–25]. Было применено три способа классификации вызванных потенциалов [26, 27]. Классификация данных производилась в оффлайн-режиме, т. е. уже после сбора данных, однако планируется, что данные алгоритмы можно будет применять и онлайн — сразу во время записи — для создания обратной связи.

Сравнение амплитуд. Простейшим способом выявления задуманной детали может являться определение строки и столбца, для которых наблюдались наибольшие значения амплитуд ВП. Для этого, в течение последовательного предъявления строк и столбцов, вычисляется среднее значение амплитуды сигнала на нескольких последних пробах одних и тех же наборов данных. В этом усредненном сигнале выбирается временной участок от 250–550 мс для анализа компонента P300 ВП. Среди всех строк и столбцов выбираются наборы данных, имеющие максимальную усредненную амплитуду сигнала (при усреднении 5 и более стимулов) во временных окрестностях компонента P300 ВП. Объект, находящийся на пересечении выбранных строки и столбца, предположительно является объектом, который был задуман испытуемым.

[1] ООО Мицар, Санкт-Петербург, Россия [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://mitsar-eeg.ru/ (дата обращения: 16.07.2025).

Метод опорных векторов. В качестве классификатора для анализа ЭЭГ может использоваться метод опорных векторов [28]. В данном случае применяется следующий подход к анализу данных. На вход алгоритма подаются ЭЭГ-данные (амплитуды) единичной пробы, а тот, в свою очередь, осуществляет бинарную классификацию: есть ли у испытуемого искомая реакция в текущей пробе или нет. При передаче амплитуд во временном интервале ВП, соответствующих компоненту P300, который наиболее чувствителен к предъявлению целевого стимула (250–550 мс после начала пробы), входными данными являются 150 последовательных временных точек сигнала (при оцифровке данных — 500 Гц). Для снижения размерности данных и, как следствие, возможного повышения точности можно использовать метод главных компонент (PCA). Задуманный объект идентифицируется следующим образом: после проведения бинарной классификации для определения того, является ли текущая проба целевой или нет, данные нескольких последних проб (по умолчанию — по 50) усредняются по меткам строк и столбцов и выбирается та деталь, которая находится на пересечении строки и столбца при предъявлении которых были выявлены наибольшие амплитуды.

Нейронная сеть. Хорошие показатели точности классификации вызванных потенциалов имеет методика с применением нейронных сетей (НС) [29, 30]. Входные и выходные данные НС такие же, что и у метода опорных векторов, т. е. она позволяет сделать бинарную классификацию на целевой/нецелевой стимул. НС была построена и обучена с помощью библиотеки PyTorch со следующей архитектурой (в дальнейшем конфигурация 1):

1) входной слой — 60 нейронов (с учетом числа временных точек в интервале и снижения размерности с использованием PCA);
2) скрытый слой — 32 нейрона, активация LeakyReLU;
3) скрытый слой — 16 нейрона, активация LeakyReLU;
4) выходной слой — 2 нейрона, активация LogSoftmax.

В ходе разработки варьировались такие гиперпараметры, как количество скрытых слоев (1/2/3), число входных нейронов (30/60/90/125), число нейронов на скрытых слоях (16/32/64) и функции активации (ReLU/LeakyReLU/Sigmoid/LogSoftmax). Однако лучшее качество показала конфигурация 1. Для снижения размерности перед подачей данных на вход также можно использовать PCA. Задуманный объект в этом случае определяется так же, как и в методе опорных векторов: после усреднения данных об амплитудах по меткам, среди меток находятся строка и столбец, соответствующие наибольшим амплитудам, на пересечении которых находится задуманная деталь.

Основные результаты

Всего было проведено 18 сессий с участием трех испытуемых: мужчины и двух женщин (средний возраст — 22 года). Выбор испытуемых был проведен на основании требований, описанных в работе [15]. Для испытуемых было записано несколько наборов данных с различными вариантами реакций на стимулы, представленных в табл. 1.

Усредненные пробы для каждого субъекта представлены на рис. 5. Данные разделены по признаку: задуманная ли деталь демонстрировалась в пробе (целевой стимул) или нет (нецелевой стимул). Усредненные пробы показали, что некоторые различия заметны, для их выявления были использованы описанные методы в разделе «Материалы и методы».

Сравнение амплитуд. При анализе подбирались различные параметры анализируемого сигнала, в частности время после предъявления пробы, рассматриваемый электрод, количество рассматриваемых проб с начала эксперимента. В качестве метрики измерения качества модели с теми или иными параметрами использовалась точность определения задуманной детали. Анализ производился в некотором окне последних проб, которое обновлялось при каждом новом предъявлении. Среди всех таких окон, возникавших в течение записи, определялось количество тех, в которых предсказанная ячейка совпадала с загаданной. Отношение верно угаданных случаев к общему числу окон и считалось точностью модели. Для модели со случайными ответами точность угадывания детали составила бы 4 %.

Для каждого набора параметров были рассчитаны точности сравнения амплитуд: средняя точность по

Таблица 1. Данные записей ЭЭГ/ВП
Table 1. EEG/Evoked Potentials (ЭЭГ/ВП) recordings data

Реакция на стимул	Количество предъявлений каждой метки	Количество подсветок целевой ячейки/стимула
Субъект 1 (6 сессий)		
Нажатие на физическую кнопку	22	45
	21	43
Мысленный подсчет	23	47
	20	41
Нажатие на воображаемую кнопку	21	43
	22	45
Субъект 2 (6 сессий)		
Нажатие на физическую кнопку	22	45
	22	45
Мысленный подсчет	22	45
	22	45
Нажатие на воображаемую кнопку	25	51
	21	43
Субъект 3 (6 сессий)		
Нажатие на физическую кнопку	20	41
	21	43
Мысленный подсчет	20	41
	20	41
Нажатие на воображаемую кнопку	20	41
	20	41

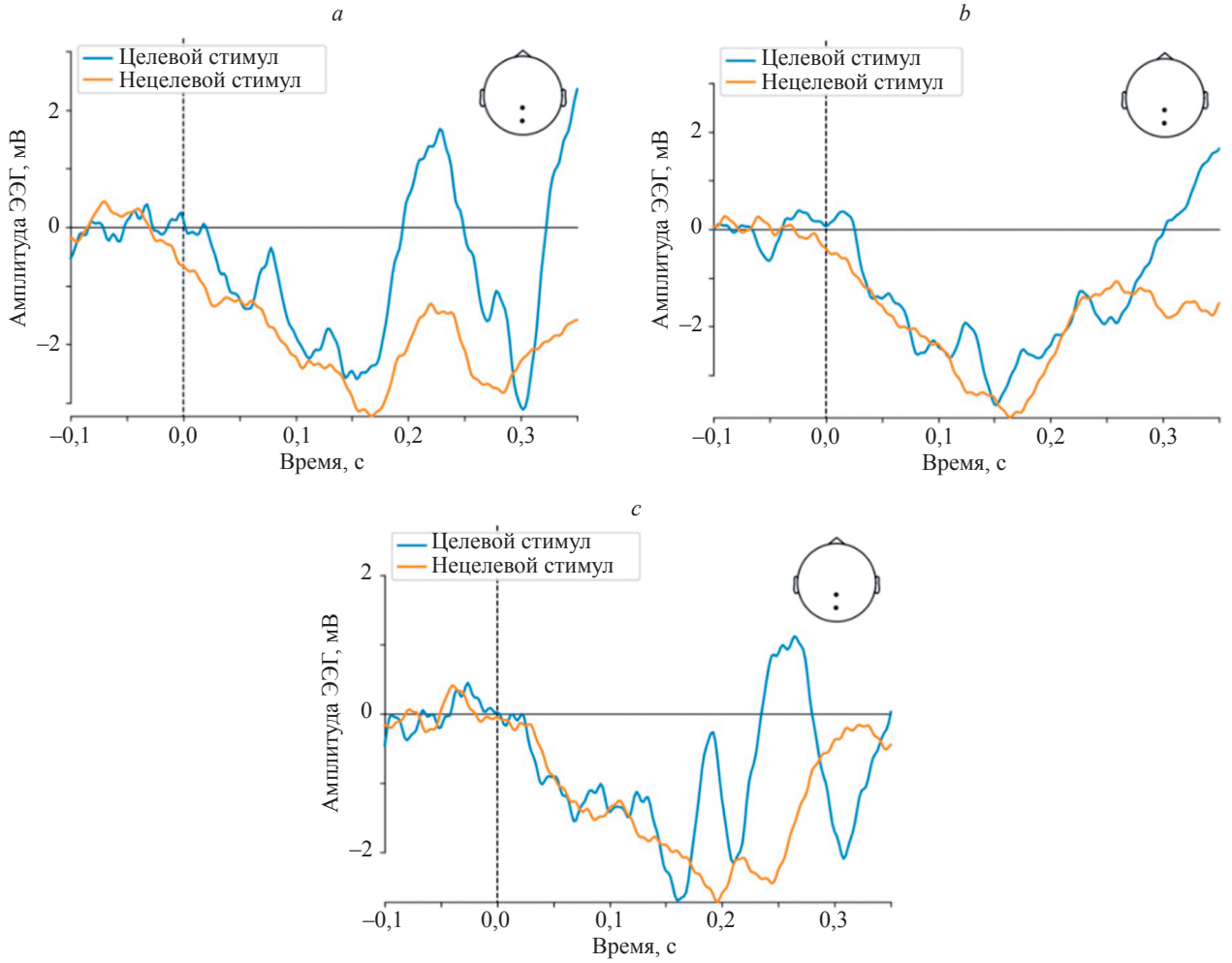


Рис. 5. Усредненные пробы для субъектов: 1 (*a*); 2 (*b*) и 3 (*c*)

Fig. 5. Average samples for subjects: 1 (*a*), 2 (*b*), and 3 (*c*)

всем записям и максимальная точность, достигнутая на какой-либо записи. Результаты по классификатору сравнения амплитуд представлены в табл. 2.

Полученные данные показывают, что точность определения некоторых записей оказалась достаточно высокой, но при усреднении по записям всех сессий и способов активации, результаты получились неудовлетворительными. Из реакций на стимул лучше всего себя показал мысленный подсчет количества подсвечивания конкретной детали, в котором средняя точность достигла 14 %.

Метод опорных векторов. Для метода опорных векторов и нейронной сети все пробы всех записей были объединены в один общий набор данных, каждой пробе была присвоена метка 1, если в этой пробе показывалась задуманная деталь, и метка 0 — в противном случае. Набор данных был разбит на тренировочную и тестовую выборки в соотношении 80:20 %. На вход подавались значения амплитуд участка сигнала от 100 до 350 мс от начала стимула, полученные с электрода Pz. Так как классы были сильно несбалансированными (на одну метку 1 приходилось четыре метки 0), то для оценки метрик использовалась взвешенная F1-мера, для модели со случайными ответами значение F1-меры было бы равно 50 %.

Средняя F1-мера после обучения метода опорных векторов, примененного ко всем записям вместе, составила (65,7 ± 1,4) %. Затем для уменьшения размерности использовался PCA, сокративший количество признаков с 125 (количество временных точек в исследуемом интервале) до 30. При этом точность не изменилась и составила (66,0 ± 1,6) %. Помимо этого, для каждого субъекта и для каждого варианта реакции испытуемого на стимул была рассчитана F1-мера, значения которой представлены в табл. 3. Видно, что максимальное достигнутое значение равно (72,6 ± 4,0) %.

Для проверки согласованности данных по трем субъектам и трем видам реакций использовался критерий хи-квадрат, который на представленных 9 вариантах экспериментов принял значение 24,95, что дало p-значение 0,0015, которое меньше 0,05, что позволяет говорить об отсутствии значимых статистических различий между экспериментами и согласованности результатов.

Таким образом, точность классификации целевого стимула во всех случаях превышает порог случайного значения, но не является очень высокой (не достигает 80–90 %).

Нейронная сеть. Для обучения нейронной сети данные разбивались аналогичным образом на тренировоч-

Таблица 2. Точность классификации по сравнению амплитуд (25 классов)

Table 2. Classification accuracy compared to amplitudes (25 classes)

Интервал, мс	Количество проб	Среднее значение, %	Максимальная точность, %
Центрально-теменное отведение Pz			
100–200	100	8,0	58,0
150–250		14,0	88,0
200–300		9,4	52,0
250–350		8,8	46,0
100–200	200	6,8	34,0
150–250		9,3	56,0
200–300		7,7	21,3
250–350		9,6	38,0
100–200	300	6,5	30,4
150–250		8,7	50,0
200–300		7,0	19,0
250–350		8,4	32,0
Центрально-затылочное отведение Oz			
100–200	100	11,0	64,0
150–250		8,9	42,0
200–300		7,3	38,0
250–350		4,1	18,0
100–200	200	8,7	34,0
150–250		8,2	43,3
200–300		9,0	32,0
250–350		8,7	32,0
100–200	300	8,6	30,4
150–250		7,5	38,7
200–300		8,3	28,6
250–350		7,9	28,1

Примечание. Порог случайного определения равен 4 % (при классификации по 25 классам).

ную и тестовую выборки. В ходе экспериментов были опробованы различные варианты нейронных сетей, однако наилучшим образом себя показала нейронная сеть конфигурации 1 (полносвязная нейронная сеть с числом нейронов 60/32/16/2). Нейронная сеть обучалась на 500 эпохах (где к классу 0 относятся нецелевые стимулы, а к классу 1 — целевые) и достигла значения для F1-меры в (70,7 ± 0,6) %. Таким образом, модель с использованием данной нейронной сети показала близкие по точности результаты с методом опорных векторов. По этой причине в дальнейшем допускается использовать любую модель из этих двух для классификации образов. Для данной конфигурации нейронной сети были рассчитаны F1-меры для каждого субъекта и для каждо-

Таблица 3. Значение F1-меры при использовании метода опорных векторов

Table 3. Value of F1-measure when using the support vector method

Реакция на стимул	F1-мера, %	
	без PCA	с PCA
Субъект 1		
Мысленный подсчет	65,9 ± 4,5	66,5 ± 4,7
Нажатие на физическую кнопку	72,6 ± 4,0	72,4 ± 4,1
Нажатие на воображаемую кнопку	68,2 ± 4,2	67,1 ± 3,7
Субъект 2		
Мысленный подсчет	63,4 ± 4,8	62,3 ± 4,1
Нажатие на физическую кнопку	70,1 ± 3,5	71,7 ± 4,7
Нажатие на воображаемую кнопку	64,5 ± 3,4	68,7 ± 2,9
Субъект 3		
Мысленный подсчет	62,9 ± 5,2	57,5 ± 2,6
Нажатие на физическую кнопку	63,3 ± 5,0	68,7 ± 4,0
Нажатие на воображаемую кнопку	62,5 ± 4,4	63,4 ± 5,0
Среднее по всем субъектам		
Средняя по всем реакциям	65,7 ± 1,4	66,0 ± 1,6

Примечание. Два класса (целевые/нецелевые стимулы), вероятность 50 %.

Таблица 4. Значение F1-меры при использовании нейронной сети

Table 4. Value of F1-measures when using a neural network

Реакция на стимул	F1-мера, %
Субъект 1	
Мысленный подсчет	70,0 ± 4,6
Нажатие на физическую кнопку	66,5 ± 4,3
Нажатие на воображаемую кнопку	65,7 ± 3,1
Субъект 2	
Мысленный подсчет	69,1 ± 4,0
Нажатие на физическую кнопку	67,8 ± 1,8
Нажатие на воображаемую кнопку	66,7 ± 2,6
Субъект 3	
Мысленный подсчет	66,6 ± 3,8
Нажатие на физическую кнопку	69,2 ± 3,0
Нажатие на воображаемую кнопку	67,7 ± 5,7
Среднее по всем субъектам	
Средняя по всем реакциям	70,7 ± 0,6

Примечание. Два класса (целевые/нецелевые стимулы), вероятность 50 %.

го варианта реакции испытуемого на стимул по отдельности, и полученные данные представлены в табл. 4.

Критерий хи-квадрат в данном случае принял значение 18,35, что дало p-значение 0,019, что меньше 0,05 и, как и в случае с методом опорных векторов, подтверждает отсутствие значимых статистических различий между экспериментами и согласованность результатов.

Онлайн-режим. Весь описанный анализ производился параллельно записи сигнала, т. е. в онлайн-режиме. Этот режим нужен для создания интерфейса мозг-компьютер [30]. Данный вариант реализуем лишь при достаточно коротком времени обработки сигнала, не превышающем продолжительности предъявления одной пробы, а лучше значительно меньшем этой продолжительности. Представленные способы удовлетворили этому условию и потому могут использоваться в онлайн-режиме, так как время расчета задуманной детали в каждом из методов происходило в среднем быстрее, чем за 4 мс. При записи с частотой 500 Гц данного временного промежутка достаточно для онлайн-обработки сигнала. Однако анализ результатов предсказаний системы во время онлайн-обработки показал, что с течением времени предсказания ухудшаются, начиная ориентировочно с 200-го предъявления, что может говорить о снижении концентрации внимания и, возможно, изменении функционального состояния испытуемого.

Алгоритм взаимодействия человека с моделью индустриальной киберфизической системы.

В качестве модели ИКФС были использованы: 3D-модели складского участка с управляемыми полками для хранения деталей и складского робота, а также комплекс разработанного программного обеспечения. Команды для управления роботом передавались в 3D-модель. Робот брал задуманную деталь из ящика и переносил ее на складской столик для последующей транспортировки к рабочему месту оператора станка.

Начало циклической деятельности человека-оператора, оснащенного ЭЭГ-шлемом, при взаимодействии с моделью ИКФС.

1. Человек-оператор и модель ИКФС получают актуальную информацию о состоянии ИКФС. Модель ИКФС принимает релевантное состояние.
2. На основе полученной информации человек-оператор принимает решение, в результате генерируются ЭЭГ-сигналы.
3. С помощью программного обеспечения (WinEEG) осуществляется предобработка сгенерированных ЭЭГ-сигналов с дальнейшей передачей данных в программный комплекс (рис. 1).
4. Работа программного комплекса.
   4.1. Обработка данных ЭЭГ (поиск паттерна).
   4.2. Определение входных данных для модели ИКФС (обучение классификатора).
   4.3. На вход модели ИКФС поступают данные для формирования управляющих команд для объектов управления.
   4.4. Оборудование ИКФС выполняет соответствующие действия.
   4.5. 3D-модель визуализирует кинематику движения оборудования ИКФС.
5. Человек-оператор наблюдает за работой оборудования ИКФС.

Конец циклической деятельности человека-оператора при взаимодействии с моделью ИКФС (при достижении целевых показателей работы ИФКС).

Заключение

Анализ представленных результатов показал, что предложенный алгоритм может качественно справляться с классификацией зрительных стимулов. При этом было показано, что он способен производить вычисления достаточно быстро и может применяться в различных нейроинтерфейсах, в которых время предъявления стимула сопоставимо со временем обработки сигнала.

Из рассмотренных трех моделей алгоритма наиболее эффективными оказались метод опорных векторов и полносвязная нейронная сеть, которые имели практически одинаковое качество обработки. В дальнейшем планируется улучшить конфигурацию нейронной сети.

В целом, необходимо отметить, что результаты работы смогли продемонстрировать возможность организации «глубоко интегрированного» взаимодействия человека с оборудованием, посредством воздействия обработанных сигналов биоэлектрической активности мозга человека (с использованием методов электроэнцефалографии) на 3D-модель производственного участка, что позволило авторам перейти к постановке исследовательских задач, которые могут включать следующие вопросы:

— анализ и выбор совместных сценариев работы нескольких участков киберфизического производства (с людьми и оборудованием), с целью исследования возможностей их тесного взаимодействия (с использованием методов электроэнцефалографии);
— построение сценариев влияния человека на сбои роботизированного оборудования, с целью предупреждения и предотвращения наступления опасных ситуаций;
— сбор психофизиологических данных о состоянии мозговой (когнитивной) активности групп людей, посредством нейроинтерфейсов, взаимодействующих с разными участками индустриальной киберфизической системы для построения согласованного набора данных с целью мониторинга и совместного принятия решений;
— проведение исследований по разработке программных решений, основанных на интеграции результатов использования нейроинтерфейсов с мультиагентным подходом для задач реконфигурации и самоорганизации киберфизического производства;
— рассмотрение возможностей применения нейроинтерфейсов для решения задач конструирования изделий, проектирования и планирования технологических процессов и других творческих задач.

Глубокая интеграция человека с оборудованием (с использованием нейроинтерфейсов) приведет к новой парадигме автоматизации производства — к эволюции, включающей кардинальные изменения в конструкторской и технологической подготовках производства, в технологиях, оборудовании и структуре производства.

Литература

1. Nazarenko A.A., Camarinha-Matos L.M. A human-al framework to design collaborative cyber physical systems // IFIP Advances in Information and Communication Technology. 2024. V. 716. P. 28–42. https://doi.org/10.1007/978-3-031-63851-0_2
2. Colombo A.W., Karnouskos S., Hanisch C. Engineering human-focused Industrial Cyber-Physical Systems in Industry 4.0 context // Philosophical Transactions of the Royal Society A Mathematical Physical and Engineering Sciences. 2021. V. 379. N 2207. P. 20200366. https://doi.org/10.1098/rsta.2020.0366
3. Schmidt D., Diez J.V., Ordieres-Meré J., Gevers R., Schwiep J., Molina M. Industry 4.0 lean shopfloor management characterization using EEG sensors and deep learning // Sensors. 2020. V. 20. N 10. P. 2860. https://doi.org/10.3390/s20102860
4. Piardi L., Leitão P., Queiroz J., Pontes J. Role of digital technologies to enhance the human integration in industrial cyber–physical systems // Annual Reviews in Control. 2024. V. 57. P. 100934. https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2024.100934
5. Zhou J., Zhou Y., Wang B., Zang J. Human–Cyber–Physical Systems (HCPSs) in the context of new-generation intelligent manufacturing // Engineering. 2019. V. 5. N 4. P. 624–636. https://doi.org/10.1016/j.eng.2019.07.015
6. Slavic D., Marjanovic U., Pezzotta G., Turcin I., Rakic S. Servitization and industry 5.0: the future trends of manufacturing transformation // IFIP Advances in Information and Communication Technology. 2023. V. 690. P. 109–121. https://doi.org/10.1007/978-3-031-43666-6_8
7. Slavic D., Romero D., Pezzotta G., Marjanovic U., Savkovic B., Popan I.A., Rakic S. Towards human-centric digital services: a development framework // IFIP Advances in Information and Communication Technology. 2024. V. 732. P. 184–197. https://doi.org/10.1007/978-3-031-71637-9_13
8. Reddy K.K., Reddy A.V., Doss S., Priyanka K. Human-machine collaboration and emotional intelligence in Industry 6.0: concepts, challenges, and future directions // Examining the Metaverse in Healthcare. 2024. P. 221–246. https://doi.org/10.4018/979-8-3693-1515-6.ch009
9. Бабкин А.В., Шкарупета Е.В. Индустрия 6.0: сущность, тенденции и стратегические возможности для России // Экономика промышленности. 2024. Т. 17. № 4. С. 353–377. https://doi.org/10.17073/2072-1633-2024-4-1369
10. Värbu K., Muhammad N., Muhammad Y. Past, present, and future of EEG-based BCI applications // Sensors. 2022. V. 2. N 9. P. 3331. https://doi.org/10.3390/s22093331
11. Kitchener P.D., Hales C.G. What neuroscientists think, and don't think, about consciousness // Frontiers in Human Neuroscience. 2022. V. 16. P. 767612. https://doi.org/10.3389/fnhum.2022.767612
12. Douibi K., Le Bars S., Lemontey A., Nag L., Balp R., Breda G. Toward EEG-based BCI applications for Industry 4.0: challenges and possible applications // Frontiers in Human Neuroscience. 2021. V. 15. P. 705064. https://doi.org/10.3389/fnhum.2021.705064
13. Гунделах Ф.В., Станкевич Л.А., Сонькин К.М., Нагорнова Ж.В, Шемякина Н.В. Применение интерфейсов «мозг-компьютер» в ассистивных технологиях // Труды СПИИРАН. 2020. Т. 19. № 2. С. 277–301. https://doi.org/10.15622/sp.2020.19.2.2
14. Gundelakh F., Stankevich L., Sonkin K. Mobile robot control based on noninvasive brain-computer interface using hierarchical classifier of imagined motor commands // MATEC Web of Conferences. 2018. V. 161. P. 03003. https://doi.org/10.1051/matecconf/201816103003
15. Капралов Н.В., Нагорнова Ж.В., Шемякина Н.В. Методы классификации ЭЭГ-паттернов воображаемых движений // Информатика и автоматизация. 2021. Т. 20. № 1. С. 94–132. https://doi.org/10.15622/ia.2021.20.1.4
16. Guo Z., Wu J., Song Y., Bu J., Mai W., Zheng Q., Ouyang W., Song C. Neuro-3D: towards 3D visual decoding from EEG signals // arXiv. 2024. arXiv:2411.12248 https://doi.org/10.48550/arXiv.2411.12248
17. Uchimura T. Robots or 3D models control by Brain-Computer Interfaces. Dissertation for the degree of Master of Science (Computer Science). Flinders University, Adelaide, 2021. 40 p.
18. Cao B., Niu H., Hao J., Wang G. Building EEG-based CAD object selection intention discrimination model using convolutional neural network (CNN) // Advanced Engineering Informatics. 2022. V. 52. P. 101548. https://doi.org/10.1016/j.aei.2022.101548
19. Duncana C.C., Barryb R.J., Connollyc J.F., Fischer C., Michie P.T., Näätänen R., et al. Event-related potentials in clinical research: Guidelines for eliciting, recording, and quantifying mismatch

References

1. Nazarenko A.A., Camarinha-Matos L.M. A human-al framework to design collaborative cyber physical systems. *IFIP Advances in Information and Communication Technology*, 2024, vol. 716, pp. 28–42. https://doi.org/10.1007/978-3-031-63851-0_2
2. Colombo A.W., Karnouskos S., Hanisch C. Engineering human-focused Industrial Cyber-Physical Systems in Industry 4.0 context. *Philosophical Transactions of the Royal Society A Mathematical Physical and Engineering Sciences*, 2021, vol. 379, no. 2207, pp. 20200366. https://doi.org/10.1098/rsta.2020.0366
3. Schmidt D., Diez J.V., Ordieres-Meré J., Gevers R., Schwiep J., Molina M. Industry 4.0 lean shopfloor management characterization using EEG sensors and deep learning. *Sensors*, 2020, vol. 20, no. 10, pp. 2860. https://doi.org/10.3390/s20102860
4. Piardi L., Leitão P., Queiroz J., Pontes J. Role of digital technologies to enhance the human integration in industrial cyber–physical systems. *Annual Reviews in Control*, 2024, vol. 57, pp. 100934. https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2024.100934
5. Zhou J., Zhou Y., Wang B., Zang J. Human–Cyber–Physical Systems (HCPSs) in the context of new-generation intelligent manufacturing. *Engineering*, 2019, vol. 5, no. 4, pp. 624–636. https://doi.org/10.1016/j.eng.2019.07.015
6. Slavic D., Marjanovic U., Pezzotta G., Turcin I., Rakic S. Servitization and industry 5.0: the future trends of manufacturing transformation. *IFIP Advances in Information and Communication Technology*, 2023, vol. 690, pp. 109–121. https://doi.org/10.1007/978-3-031-43666-6_8
7. Slavic D., Romero D., Pezzotta G., Marjanovic U., Savkovic B., Popan I.A., Rakic S. Towards human-centric digital services: a development framework. *IFIP Advances in Information and Communication Technology*, 2024, vol. 732, pp. 184–197. https://doi.org/10.1007/978-3-031-71637-9_13
8. Reddy K.K., Reddy A.V., Doss S., Priyanka K. Human-machine collaboration and emotional intelligence in Industry 6.0: concepts, challenges, and future directions. *Examining the Metaverse in Healthcare*, 2024, pp. 221–246. https://doi.org/10.4018/979-8-3693-1515-6.ch009
9. Babkin A.V., Shkarupeta E.V. Industry 6.0: the essence, trends and strategic opportunities for Russia. *Russian Journal of Industrial Economics*, 2024, vol.17, no. 4, pp. 353-377. (in Russian). https://doi.org/10.17073/2072-1633-2024-4-1369
10. Värbu K., Muhammad N., Muhammad Y. Past, present, and future of EEG-based BCI applications. *Sensors*, 2022, vol. 2, no. 9, pp. 3331. https://doi.org/10.3390/s22093331
11. Kitchener P.D., Hales C.G. What neuroscientists think, and don't think, about consciousness. *Frontiers in Human Neuroscience*, 2022, vol. 16, pp. 767612. https://doi.org/10.3389/fnhum.2022.767612
12. Douibi K., Le Bars S., Lemontey A., Nag L., Balp R., Breda G. Toward EEG-based BCI applications for Industry 4.0: challenges and possible applications. *Frontiers in Human Neuroscience*, 2021, vol. 15, pp. 705064. https://doi.org/10.3389/fnhum.2021.705064
13. Gundelakh F., Stankevich L., Sonkin K., Nagornova G., Shemyakina N. Application of Brain-computer interfaces in assistive technologies. *SPIIRAS Proceedings*, vol. 19, no. 2, pp. 277–301. (in Russian). https://doi.org/10.15622/sp.2020.19.2.2
14. Gundelakh F., Stankevich L., Sonkin K. Mobile robot control based on noninvasive brain-computer interface using hierarchical classifier of imagined motor commands. *MATEC Web of Conferences*, 2018, vol. 161, pp. 03003. https://doi.org/10.1051/matecconf/201816103003
15. Kapralov N., Nagornova Z., Shemyakina N. Classification methods for EEG patterns of imaginary movements. *Informatics and Automation*, 2021. vol. 20, no. 1, pp. 94–132. (in Russian). https://doi.org/10.15622/ia.2021.20.1.4
16. Guo Z., Wu J., Song Y., Bu J., Mai W., Zheng Q., Ouyang W., Song C. Neuro-3D: towards 3D visual decoding from EEG signals. *arXiv*, 2024, arXiv:2411.12248 https://doi.org/10.48550/arXiv.2411.12248
17. Uchimura T. *Robots or 3D models control by Brain-Computer Interfaces*. Dissertation for the degree of Master of Science (Computer Science). Flinders University, Adelaide, 2021. 40 p.
18. Cao B., Niu H., Hao J., Wang G. Building EEG-based CAD object selection intention discrimination model using convolutional neural network (CNN). *Advanced Engineering Informatics*, 2022, vol. 52, pp. 101548. https://doi.org/10.1016/j.aei.2022.101548
19. Duncana C.C., Barryb R.J., Connollyc J.F., Fischer C., Michie P.T., Näätänen R., et al. Event-related potentials in clinical research: Guidelines for eliciting, recording, and quantifying mismatch

negativity, P300, and N400 // Clinical Neurophysiology. 2009. V. 120. N 11. P. 1883–1908. https://doi.org/10.1016/j.clinph.2009.07.045
20. Gonzalez-Santocildes A., Vazquez J.-I., Eguiluz A. Enhancing robot behavior with EEG, reinforcement learning and beyond: a review of techniques in collaborative robotics // Applied Sciences. 2024. V. 14. N 14. P. 6345. https://doi.org/10.3390/app14146345
21. Александров М.В., Иванов Л.Б., Лытаев С.А. Электроэнцефалография: Руководство. СПб.: СпецЛит, 2020. 224 с.
22. Марусина М.Я., Бурдаев И.В. Автоматическое распознавание зрительных стимулов по единичным вызванным потенциалам на электроэнцефалограмме // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2023. Т. 66. № 3. С. 247–250. https://doi.org/10.17586/0021-3454-2023-66-3-247-250
23. Baiano C., Zeppieri M. Visual Evoked Potential // StatPearls [Internet]. 2023. PMID: 35881733
24. Флах П. Машинное обучение. Наука и искусство построения алгоритмов, которые извлекают знания из данных. М.: ДМК Пресс, 2015. 402 с.
25. Вейдман С. Глубокое обучение: легкая разработка проектов на Python. СПб.: Питер, 2021. 272 с.
26. Qi J., Hu J., Peng Y., Ren Q., Wang W., Zhan Z. Integration of similarity measurement and dynamic SVM for electrically evoked potentials prediction in visual prostheses research // Expert Systems with Applications. 2011. V. 38. N 5. P. 5044–5060. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2010.09.145
27. Swihart S.L., Matheny A. Classification of chromatic visual evoked potentials with the aid of a neural net // Computers in Biology and Medicine. 1992. V. 22. N 3. P. 165–171. https://doi.org/10.1016/0010-4825(92)90012-c
28. Zheng X., Cao Z., Bai Q. An evoked potential-guided deep learning brain representation for visual classification // Communications in Computer and Information Science. 2020. V. 1333. P. 54–61. https://doi.org/10.1007/978-3-030-63823-8_7
29. Zhang Y., Xie S., Wang H., Zhang Z. Data analytics in steady-state visual evoked potential-based brain-computer interface: a review // IEEE Sensors Journal. 2021. V. 21. N 2. P. 1124–1138. https://doi.org/10.1109/jsen.2020.3017491
30. Cui Z., Chen W., Chen Y. Multi-scale convolutional neural networks for time series classification // arXiv. 2016. arXiv:1603.06995. https://arxiv.org/abs/1603.06995

negativity, P300, and N400. *Clinical Neurophysiology*, 2009, vol. 120, no. 11, pp. 1883–1908. https://doi.org/10.1016/j.clinph.2009.07.045
20. Gonzalez-Santocildes A., Vazquez J.-I., Eguiluz A. Enhancing robot behavior with EEG, reinforcement learning and beyond: a review of techniques in collaborative robotics. *Applied Sciences*, 2024, vol. 14, no. 14, pp. 6345. https://doi.org/10.3390/app14146345
21. Aleksandrov M.V., Ivanov L.B., Lytaev S.A. *Electroencephalography*. St. Petersburg, SpecLit Publ., 2020, 224 p. (in Russian)
22. Marusina M.Ya., Burdaev I.V. Automatic recognition of visual stimules by single evoked potentials on an electroencephalogram. *Journal of Instrument Engineering*, 2023, vol. 66, no. 3, pp. 247-250. (in Russian). https://doi.org/10.17586/0021-3454-2023-66-3-247-250
23. Baiano C., Zeppieri M. *Visual Evoked Potential*. StatPearls [Internet], 2023, PMID: 35881733.
24. Flach P. *Machine Learning: The Art and Science of Algorithms that Make Sense of Data*. Cambridge University Press, 2012, 409 p.
25. Weidman S. *Deep Learning from Scratch: Building with Python from First Principles*. O'Reilly Media, 2019, 250 p.
26. Qi J., Hu J., Peng Y., Ren Q., Wang W., Zhan Z. Integration of similarity measurement and dynamic SVM for electrically evoked potentials prediction in visual prostheses research. *Expert Systems with Applications*, 2011, vol. 38, no. 5, pp. 5044–5060. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2010.09.145
27. Swihart S.L., Matheny A. Classification of chromatic visual evoked potentials with the aid of a neural net. *Computers in Biology and Medicine*, 1992, vol. 22, no. 3, pp. 165–171. https://doi.org/10.1016/0010-4825(92)90012-c
28. Zheng X., Cao Z., Bai Q. An evoked potential-guided deep learning brain representation for visual classification. *Communications in Computer and Information Science*, 2020, vol. 1333, pp. 54–61. https://doi.org/10.1007/978-3-030-63823-8_7
29. Zhang Y., Xie S., Wang H., Zhang Z. Data analytics in steady-state visual evoked potential-based brain-computer interface: a review. *IEEE Sensors Journal*, 2021, vol. 21, no. 2, pp. 1124–1138. https://doi.org/10.1109/jsen.2020.3017491
30. Cui Z., Chen W., Chen Y. Multi-scale convolutional neural networks for time series classification. *arXiv*, 2016, arXiv:1603.06995. https://arxiv.org/abs/1603.06995

Авторы

Сизов Михаил Сергеевич — студент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, https://orcid.org/0009-0003-4562-7675, mssizov@gmail.com
Марусина Мария Яковлевна — доктор технических наук, профессор, профессор, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, sc 56281574700, https://orcid.org/0000-0002-5611-8812, myamarusina@itmo.ru
Киприянов Кирилл Васильевич — ассистент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, sc 56719823800, https://orcid.org/0000-0003-0155-6900, kvkipriianov@itmo.ru
Архипов Валерий Александрович — инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, sc 56719760700, https://orcid.org/0009-0006-8319-653X, valery.arckhipov@itmo.ru
Лоу Цзячэн — аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, https://orcid.org/0009-0009-1026-6834, 623619178@qq.com
Нагорнова Жанна Владимировна — кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Институт эволюционной физиологии и биохимии имени И. М. Сеченова РАН, Санкт-Петербург, 194223, Российская Федерация, sc 16643058800, https://orcid.org/0000-0002-6476-3141, nagornova_zh@mail.ru
Шемякина Наталья Вячеславовна — кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, Институт эволюционной физиологии и биохимии имени И. М. Сеченова РАН, Санкт-Петербург, 194223, Российская Федерация, sc 9037089700, https://orcid.org/0000-0002-8936-0082, shemyakina_n@mail.ru

Authors

Mihail S. Sizov — Student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, https://orcid.org/0009-0003-4562-7675, mssizov@gmail.com
Maria Ya. Marusina — D.Sc., Full Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, sc 56281574700, https://orcid.org/0000-0002-5611-8812, myamarusina@itmo.ru

Kirill V. Kipriianov — Assistant, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, sc 56719823800, https://orcid.org/0000-0003-0155-6900, kvkipriianov@itmo.ru
Valery A. Arckhipov — Engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, sc 56719760700, https://orcid.org/0009-0006-8319-653X, valery.arckhipov@itmo.ru
Jiacheng Lou — PhD Student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, https://orcid.org/0009-0009-1026-6834, 623619178@qq.com
Zhanna V. Nagornova — PhD (Biology), Senior Researcher, Sechenov Institute of Evolutionary Physiology and Biochemistry of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, 194223, Russian Federation, sc 16643058800, https://orcid.org/0000-0002-6476-3141, nagornova_zh@mail.ru
Natalia V. Shemyakina — PhD (Biology), Leading Researcher, Sechenov Institute of Evolutionary Physiology and Biochemistry of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, 194223, Russian Federation, sc 9037089700, https://orcid.org/0000-0002-8936-0082, shemyakina_n@mail.ru

Статья поступила в редакцию 20.12.2024
Одобрена после рецензирования 25.06.2025
Принята к печати 24.07.2025

Received 20.12.2024
Approved after reviewing 25.06.2025
Accepted 24.07.2025

Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ
июль–август 2025 Том 25 № 4 http://ntv.ifmo.ru/
SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL OF INFORMATION TECHNOLOGIES, MECHANICS AND OPTICS
Jule–August 2025 Vol. 25 No 4 http://ntv.ifmo.ru/en/
ISSN 2226-1494 (print) ISSN 2500-0373 (online)

doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-4-755-761

An improved authentication protocol for self-driving vehicles based on Diffie–Hellman algorithm

Muhammad Salman Saeed[1], Sergey V. Bezzateev[2]✉

[1] ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation
[2] Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation (SUAI), Saint Petersburg, 190000, Russian Federation

[1] salman.saeed@itmo.ru, https://orcid.org/0009-0006-1425-4863
[2] bsv@guap.ru✉, https://orcid.org/0000-0002-0924-6221

Abstract
Authentication is a critical challenge in autonomous vehicles, particularly within Controller Area Networks which are prone to various cyber threats. Existing protocols often fall short in balancing strong security guarantees with computational efficiency and privacy preservation. In this paper, we propose a lightweight authentication protocol based on the Decisional Diffie–Hellman problem, specifically designed for Controller Area Network environments. The protocol employs lightweight cryptographic operations to verify vehicle authenticity and validate data messages, while also maintaining anonymity by regularly updating login identities. It also supports password changes without requiring a trusted third party. The protocol security is formally verified using Burrows-Abadi-Needham logic. Performance evaluation shows that our approach significantly reduces computational overhead, achieving an execution time of 0.90908 ms, outperforming existing solutions in the literature. By combining formal verification with practical efficiency, the proposed protocol offers a robust solution for secure and efficient authentication in resource-constrained vehicular networks. Its lightweight design and anonymity-preserving mechanisms make it particularly suitable for real-time autonomous vehicle applications.

Keywords
autonomous vehicles, controller area networks, authentication protocol, efficient authentication, anonymity-preserving mechanisms

Acknowledgments
The work was carried out within the framework of the State Assignment (project No. FSER-2025-0003).

For citation: Saeed M.S., Bezzateev S.V. An improved authentication protocol for self-driving vehicles based on Diffie–Hellman algorithm. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2025, vol. 25, no. 4, pp. 755–761. doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-4-755-761

УДК 004.056

Улучшенный протокол аутентификации беспилотных транспортных средств, использующий алгоритм Диффи–Хэллмана

Мухаммад Салман Саид[1], Сергей Валентинович Беззатеев[2]✉

[1] Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация
[2] Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, 190000, Российская Федерация

[1] salman.saeed@itmo.ru, https://orcid.org/0009-0006-1425-4863
[2] bsv@guap.ru✉, https://orcid.org/0000-0002-0924-6221

Аннотация
Аутентификация является критически важной задачей в автономных транспортных средствах, особенно в сетях контроллеров, которые подвержены различным киберугрозам. Существующие протоколы часто не обеспечивают надлежащий баланс между высокими гарантиями безопасности, вычислительной эффективностью

© Saeed M.S., Bezzateev S.V., 2025

и защитой конфиденциальности. В работе предлагается облегченный протокол аутентификации, основанный на предположении о сложности решения задачи Диффи–Хеллмана, специально разработанный для сети контроллеров. Протокол использует простые криптографические операции для проверки подлинности транспортного средства и подтверждения достоверности передаваемых данных, при этом поддерживая анонимность за счет регулярного обновления идентификаторов входа. Также поддерживается смена пароля без необходимости в доверенном третьем лице. Безопасность протокола формально подтверждена с использованием логики Берроуза–Абади–Нидхема. Оценка производительности показывает, что предложенный подход значительно снижает вычислительные затраты, достигая времени выполнения 0,90908 мс, что превосходит существующие решения, представленные в подобных научных работах. Благодаря сочетанию формальной верификации и практической эффективности, предлагаемый протокол представляет собой надежное решение для безопасной и эффективной аутентификации в условиях ограниченных ресурсов транспортных сетей. Простая структура и механизмы сохранения анонимности делают предлагаемый протокол особенно подходящим для приложений в реальном времени в автономных транспортных системах.

Ключевые слова

автономные транспортные средства, сети контроллеров, протокол аутентификации, эффективная аутентификация, механизмы сохранения анонимности

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания (проект № FSER-2025-0003).

Ссылка для цитирования: Саид М.С., Беззатеев С.В. Улучшенный протокол аутентификации беспилотных транспортных средств, использующий алгоритм Диффи–Хэллмана // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2025. Т. 25, № 4. С. 755–761 (на англ. яз.). doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-4-755-761

Introduction

With the rapid growth of vehicle communication technologies, like cellular networks, Autonomous Vehicles (AVs) are reality now. These networks allow vehicles to interact with each other, enabling applications, such as cooperative safety driving, location-based services, and media sharing [1]. However, as these services become more common, they raise serious security issues, particularly around user and message authentication [2]. Without proper safeguards, attackers could exploit vulnerabilities to carry out attacks like replay, identity theft, or impersonation, threatening the security of vehicle networks.

Vehicle Controller Area Networks (CANs) are especially vulnerable because they require fast, reliable communication to ensure the safety of drivers and passengers. For instance, in safety-critical applications, even a slight delay in message delivery (more than 0.5 s) can lead to accidents [3]. Besides efficiency, it's also crucial to protect user privacy by keeping vehicle identities and travel routes anonymous, shielding them from potential attackers. For an AV, early authentication before joining a network is critical. A Central Authority (CA) should be responsible for this process. The vehicle sends a join request to the CA when it connects to a nearby Base Station Transceiver (BTS). The CA then verifies the authenticity of both the vehicle and the BTS before allowing the vehicle to connect. In Figure below, we explained the authentication architecture for AV in detail.

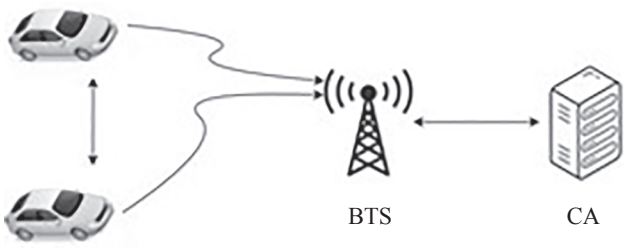


Figure. Authentication architecture for AV

While many existing privacy-preserving authentication systems focus on verifying message validity, they often fall short in verifying user legitimacy, leaving them open to active attacks [4–6]. Additionally, the high computational demands of these methods, which frequently rely on bilinear pairings and scalar multiplications, make them impractical for resource-limited vehicle environments. To tackle these issues, we introduce a new, lightweight, and anonymous authentication protocol tailored for CAN environments. Our approach uses the Decisional Diffie-Hellman (DDH) assumption to enhance both security and computational efficiency. Unlike prior methods, our protocol ensures that vehicles are authenticated before joining the network, while also verifying the integrity of transmitted data. By using dynamically generated login identities, it preserves anonymity and prevents attackers from linking real identities to vehicles. Moreover, our protocol features a password change mechanism that doesn't depend on a CA or third-party servers, making it resistant to offline password guessing attacks. We also provide a formal security analysis using Burrows-Abadi-Needham (BAN) logic, demonstrating that our protocol is secure under the DDH assumption.

Our performance evaluation shows that this protocol significantly reduces computational costs compared to existing approaches. In this paper, we define efficiency through measurable metrics, such as the number of cryptographic operations (e.g., exponentiation, hash, exclusive OR), total protocol execution time (in milliseconds), and reduced communication overhead. This definition provides a clear and quantifiable basis for evaluating the effectiveness of our proposed solution.

Related Work

Authentication in AV is a key area of research due to the security and privacy risks in vehicle communication [7]. In recent years, various protocols have been developed to improve user security and privacy while maintaining the

efficiency required for real-time vehicle operations. Several privacy-preserving authentication schemes for Vehicular Ad Hoc Networks (VANETs) have been designed to protect user identities and secure communications.

Ying et al. [8] introduced a lightweight protocol called Anonymous and lightweight authentication scheme Smart Card (ASC) for securing vehicular networks. While it offers efficient authentication and privacy, later research [9] exposed its vulnerability to offline impersonation and location spoofing attacks. This underscores the need for protocols that not only offer basic security but also resist a wider range of attacks. Lee et al. [10] developed a honey list-based authentication protocol that strengthens VANET security by using deception techniques to counter brute-force password guessing and impersonation attempts. It uses mock credentials alongside real ones, and if an attacker uses false credentials, the system triggers an alert to detect malicious activity quickly.

Li et al. [11] presented a privacy-preserving authentication scheme focused on explainability, ensuring legitimate users aren't falsely accused of wrongdoing. Using elliptic curve cryptography and group signatures, it balances computational efficiency with privacy, protecting vehicle identities and messages while maintaining performance. Parmar et al. [12] introduced a privacy-preserving authentication scheme using blockchain technology, shifting from traditional centralized models to a decentralized approach. Blockchain immutable ledger improves security and privacy, preventing attacks like message tampering and replay attacks, while eliminating the risk of single-point failures.

Vasudev et al. [13] proposed a lightweight mutual authentication protocol for Vehicle-to-Vehicle communication in the Internet of Vehicles, aiming to reduce computational overhead. Their protocol focuses on efficient mutual authentication without relying heavily on resource-intensive cryptography, making it suitable for real-time environments like smart cities. For CAN, there is increasing concern about the lack of secure and simple authentication methods. CAN systems are sensitive to message delays, and many existing protocols are not suitable for such environments. Some proposed solutions use lightweight cryptographic operations, such as hash functions and symmetric encryption, to reduce computation costs, but they often compromise anonymity or fail to handle dynamic identities effectively [14].

To address these limitations, we are exploring advanced cryptographic methods, such as the DDH assumption, to improve the efficiency and security of CAN authentication protocols. Formal security analysis using BAN logic [15] is also important for proving robustness against attacks like replay, impersonation, and man-in-the-middle. Despite these advancements, there is still a need for a straightforward authentication protocol that addresses security and privacy concerns while minimizing computational costs and ensuring anonymity in CAN environments. Our protocol aims to fill this gap by leveraging DDH for improved security and using dynamically generated login identities to ensure anonymity, without relying on a trusted third party.

Proposed Model and Assumptions

Let G be a finite cyclic group of prime number p that is created by the function g. The elements of G are represented as $g^n \bmod p$, where $n \in [1, p-1]$, and the operation within the group is multiplication modulo p. Rather than relying on computations within cyclic groups for the Computational Diffie–Hellman (CDH) or Discrete Logarithm assumptions, we employed the DDH assumption. The DDH problem is concerned with distinguishing between two types of tuples in group G. Given three elements $g^a \bmod p$, $g^b \bmod p$, and $g^c \bmod p$, (where $a, b, c \in [1, p-1]$), the task is to decide whether $c = a \cdot b$ (i.e., whether the third element is equal to $g^{ab} \bmod p$) or whether c is a random value in G.

In other words, the DDH assumption asserts that given the tuple (g, g^a, g^b, g^c), it is computationally hard to distinguish whether g^c is the result of g^{ab} whether c is a random value in the group. This makes DDH a decision problem, as opposed to the CDH problem previously used technique for proposing the authentication protocol which focuses on calculating $g^{ab} \bmod p$ directly. In terms of securing the AV, the three important components are: first is the Vehicle (V_i) itself, second is the BTS, and the third one is the CA which have authenticated the legitimate user. Table 1 below describes the key notations used within this paper.

Proposed Protocol

The five phases of our proposed authentication system are: user registration, user login, user authentication, password change, and data authentication. Before a user can access the network, their smart cards are assigned to them in the user registration step. While the password update phase ensures resilience to offline password guessing attacks, the user login and authentication phases serve to verify the legitimacy of users. In the data authentication phase, messages between vehicles are verified. The following subsections contain the details of the protocol. Please note that timestamps are used in the attached messages to reduce

Table 1. List of Used Notations

Notation	Description
G	Finite cyclic group under multiplicative operation
x	Private key of the CA
H_0, H_1, H_2, H_3	Cryptographic hash functions
n_i	Random number generated by the user V_i
ID_{V_i}	Identity of vehicle
PW_i	Password of the user
N_i	Hash value derived from PW_i and n_i
r_{CA}	Random value generated by the CA
C_{CA}	Challenge generated by the CA
C_{V_i}	Response from the user V_i
T_{update}	Timestamp for password update
T_{msg}	Timestamp for message freshness
M	Message exchanged between vehicles

replay attacks and check the relevance of the semantic content.

User Registration Phase

Assume that $G = \langle g \rangle$ is a finite cyclic group with order p under multiplicative operations, where g is the group generator and p is a prime number. We use hash functions H_i ($i = 0, 1, 2, 3$) that map from $\{0, 1\}^*$ to $\{0, 1\}^{l_i}$, where l_i is the length of the outputs of the hash functions.

Let (x, $y = g^x \bmod p$) be the private key and public key pair of the CA, where x is the CA private key, and $y = g^x \bmod p$ is the public key. A vehicular user V_i must register before accessing the network for the first time. The vehicle V_i must pass through the below steps:

— Firstly, after generating a random number n_i, the user V_i submits their identity ID_{V_i} and $H_0(PW_i||n_i)$ to the CA via a secure channel;

— Secondly, the user's identity and timestamp T_{reg} are stored by the CA when it receives the registration request at T_{reg}, and computes the following:

$$PV_{ID_{V_i}} = H_0(ID_{V_i}),\ A_i = H_0(H_0(PW_i||n_i)||PV_{ID_{V_i}}),$$

$$N_i = H_0(PW_i||n_i) \oplus H_0(x||PV_{ID_{V_i}}||T_{reg}).$$

After passing through these steps, the CA then assigns the smart card to V_i which contains the necessary parameters for future authentication. An attacker cannot readily guess the right password since it is protected by the random integer n_i and the one-way hash function $H_0(\cdot)$, which mitigates insider attacks.

User Login Phase

In the user login phase, a user V_i who holds a smart card needs to authenticate their credentials with the CA before accessing the network. Let g be the generator of a cyclic group G of prime order p, with $y = g^x \bmod p$ as the public key of CA (where x is the private key).

— The user inserts their smart card and inputs their password PW_i. The smart card calculates, $N_i = H_0(PW_i||n_i)$, where n_i is a random number stored in the smart card.

— The smart card generates a fresh random number $r_i \in [1, p-1]$ and computes g^{r_i}. This is sent along with ID_{V_i} to the CA.

— Upon receiving this, the CA checks the validity of ID_{V_i}. It then generates its own random value $r_{CA} \in [1, p-1]$ and computes $g^{r_{CA}} \bmod p$.

— The CA computes $H_0(x||PV_{ID_{V_i}})$, retrieves the stored values for V_i, and sends a challenge C_{CA} and $g^{r_{CA}} \bmod p$ to the user.

User Authentication Phase

In this phase, the user V_i must prove their legitimacy based on the challenge received from CA.

Step 1. Upon receiving $g^{r_{CA}} \bmod p$ and the challenge C_{CA}, the smart card computes $g^{r_{CA}r_i} \bmod p$. Under the DDH assumption, an adversary cannot distinguish between this Diffie–Hellman shared key and a random element, ensuring security.

Step 2. The smart card generates a response $C_{V_i} = H_1(g^{r_{CA}r_i}||N_i||T_{login})$, where T_{login} is the timestamp of the login request. The response C_{V_i} and timestamp T_{login} are sent back to the CA.

Step 3. The CA computes the same value $g^{r_{CA}r_i} \bmod p$ and verifies the response C_{V_i} against its own calculation of $H_1(g^{r_{CA}r_i}||N_i||T_{login})$. If they match, V_i is authenticated.

Password Change Phase

The password change phase is intended to allow users to update their password without directly involving the certification authority. This phase ensures that password guessing attacks are prevented and is secured using the DDH assumption.

Step 1. The user V_i, after authenticating themselves, decides to change the password PW_i. The user generates a new random number n'_i and calculates the new password hash $H_0(PW_i||n'_i)$.

Step 2. The smart card stores this new value and updates the associated parameters $N'_i = H_0(PW'_i||n'_i) \oplus \oplus H_0(x||PV_{ID_{V_i}}||T_{update})$, where T_{update} is the current timestamp.

Step 3. The new password is now used for future login attempts, with the security of the DDH assumption ensuring that an attacker cannot calculate the new password even if they observe the password change process.

Data Authentication Phase

The data authentication phase ensures that messages exchanged between vehicles are authentic and have not been tampered with. This phase is crucial to prevent replay attacks, message forgery and ensure data integrity.

Step 1. Vehicle V_i generates a new message M to send to vehicle V_j. The message includes a fresh timestamp T_{msg} and a hash $H_2(M||T_{msg}||N_i)$ for integrity protection.

Step 2. The message M, the hash, and the timestamp are sent to V_j. Once received, V_j checks the timestamp to ensure the freshness of the message and calculates the hash using N_i, known to it from previous authentication phases.

Step 3. If the calculated hash matches the received hash, the message is accepted as authentic. The DDH assumption secures this phase by ensuring that, even if adversaries observe the values exchanged, they cannot infer sensitive information or forge messages.

Formal Security Proof

BAN logic is a well-known modal logic framework used to verify the correctness of cryptographic protocols by analyzing their security properties. It serves as a formal method for assessing whether the goals of authentication protocols are achieved. The process of BAN logic involves four key steps: idealizing the protocol, specifying the assumptions, identifying the security objectives, and finally deriving conclusions based on the logic inference rules. In our work, we apply BAN logic to evaluate the security of our proposed protocol.

1. Notations of BAN Logic. The main notations used in BAN logic that defines beliefs and assertions [15] are listed in our Notation Table 2.

In the Table 2 presented, in accordance with [15], P and Q denote entities and X denotes information.

2. Initial Assumptions. Before the analysis begins, we make the following assumptions:

$V_i \equiv (\text{CA} \leftrightarrow V_i)$,

$\text{CA} \equiv (V_i \leftrightarrow \text{CA})$.

Table 2. BAN Logic Notations

Notation	Description
P believes X: P ≡ X	Statement X is believed by entity P
P sees X: P ◁ X	Statement X has been received by Entity P
P once said X: P ~ X	At some point, entity P sent a message that included X
P controls X: P ⇒ X	Entity P can verify the legitimacy of X and has jurisdiction over it
Fresh(X): # (X)	The message X is fresh
P ↔ Q	Entities P and Q share a secure key for communication

In the user Registration phase, the user V_i and the CA share a common secret key established during the registration.

$V_i \equiv (V_i \leftrightarrow \text{CA})$,

$V_i \lhd M$.

In user Login phase, the user V_i believes that the message M received from the CA is fresh.

$\text{CA} \equiv \#(T_{login})$.

In user Authentication phase, the CA believes the timestamp T_{login} is fresh and the user is authenticated.

3. Protocol Proof using BAN Logic. We demonstrate that the suggested approach can accomplish mutual authentication securely by using BAN logic rules, considering the aforementioned assumptions and security goals. The concrete steps are listed as follows:

User Registration Phase

The BAN logic assumption is that the user V_i receives a smart card with credentials, and the user believes that the CA has authenticated them.

$V_i \equiv (\text{CA} \equiv V_i)$,

$V_i \equiv (\text{CA} \leftrightarrow V_i)$.

This indicates that the user perceives that the CA has verified their legitimacy and has shared a key for communication.

User Login Phase

In this phase, the user sends a message to the CA. The assumptions we can make are:

$\text{CA} \equiv \#(T_{login})$,

$\text{CA} \equiv V_i \leftrightarrow \text{CA}$.

The CA believes the login message with T_{login} is fresh, meaning it hasn't been replayed. After receiving the response from the CA, the user believes the CA authenticated them.

$V_i \equiv \#(T_{login})$,

$V_i \equiv (\text{CA} \leftrightarrow V_i)$.

The user believes the CA is fresh and trusts communication.

User Authentication Phase

After receiving the challenge from the CA, the user V_i replies with C_{V_i}. Here, both the user and CA believe the session is secure.

$\text{CA} \equiv \#(T_{login})$.

The CA believes the timestamp T_{login} is fresh, validating the session.

$V_i \equiv (\text{CA} \leftrightarrow V_i)$.

The user trusts that the CA is secure.

Password Change Phase

This step makes sure the user may modify their password independently of the CA.

$V_i \equiv (V_i \leftrightarrow \text{CA})$.

The user believes that the password change is valid.

Data Authentication Phase

In this phase, vehicles authenticate messages among themselves. The assumption is:

$V_i \equiv (V_j \leftrightarrow V_i)$.

Vehicle V_i believes that V_j (another vehicle) is sending authenticated data.

$V_i \equiv \#(T_{msg})$.

V_i believes the message timestamp T_{msg} is fresh and that the message has not been replayed.

At the end of the analysis, all the protocol goals are met, the user V_i believes they are authenticated by the CA, also the messages sent between vehicles are authenticated and trusted and the timestamps ensure that replay attacks are mitigated.

Performance Analysis

In this section, we analyze the computational cost of the proposed authentication protocol, comparing it with previous protocols from the literature, specifically those outlined in Ying et al. [8] and other relevant works. The computational efficiency of cryptographic operations is critical in AV environments. For this reason, we define efficiency by assessing

— the execution time of cryptographic primitives,
— the number of operations per protocol phase, and
— the total latency incurred by authentication and data exchange.

These metrics allow for a concrete comparison of the computational burden across different schemes.

Compared to the work of Ying et al. [8], which employed the CDH assumption and had a higher computational cost due to the number of hash function operations (t_h) and modular exponential operations (t_e), our protocol, based on the DDH assumption, reduces the total number of costly operations. In our implementation[1], hash function operation requires 0.00074 ms, modular exponential operation requires 0.45 ms, and XOR operation (t_x) requires 0.0002 ms. Ying et al. [8] had a total computational cost of 1.608 ms, largely due to the increased number of exponentiations. While our protocol reduces this by minimizing the number of modular exponentiations and focusing on lighter hash and XOR operations, achieving a computational cost of 0.90908 ms, a reduction from all previously available protocols.

For a better comparison we used the same parameters taken by Mun et al. [16], Zhao et al. [17], Ying et al. [8], and Cui et al. [18] in their articles. For a better understanding of the computational cost for all the previously available studies with our study, we illustrated all the results in Table 3 below.

[1] Crypto++ 5.6.0 Benchmarks. Available at: http://www.cryptopp.com/benchmarks.html (accessed: 20.03.2025).

Table 3. Comparison for the computational cost for different protocols

Protocol	Computational Cost	Time, ms
Mun et al. [16]	$2t_{asm} + 12t_h$	3.088
Zhao et al. [17]	$8t_{mu} + 11t_h + 2t_{e/d} + 2t_s$	9.308
Ying et al. [8]	$2t_e + 11t_h + t_{e/d}$	1.608
Cui et al. [18]	$35t_h + 4t_{mu} + 1t_{fe}$	1.047
Our Protocol	$2t_e + 12t_h + 2t_x$	0.909

Conclusion

In this paper, we presented a lightweight and efficient authentication protocol for vehicular networks, designed to balance security and performance under the Decisional Diffie–Hellman assumption. Our main goal was to reduce computational effort while maintaining strong security against common vehicular network attacks, such as replay, identity theft, and offline password guessing.

The proposed protocol significantly lowers computational costs compared to earlier schemes based on the Computational Diffie–Hellman assumption. Our performance analysis shows that the total computational time for our protocol is approximately 0.90908 ms, making it highly suitable for real-time applications in Autonomous Vehicles (AVs), where both low latency and high security are critical. Additionally, we used Burrows-Abadi-Needham logic to formally verify that the protocol achieves key security properties, including mutual authentication and message integrity. By reducing computational complexity without sacrificing security, this protocol offers an ideal solution for real-world deployment in AV environments.

In future work, we plan to extend the protocol with advanced features such as blockchain integration. While our current approach uses centralized architecture via a trusted Central Authority, which ensures fast and efficient authentication in well-connected environments, we recognize the limitations of such models. Centralized systems can be susceptible to availability or integrity attacks due to single points of failure. In contrast, decentralized (e.g., blockchain-based or multi-agent) models offer improved resilience and may be better suited for distributed, infrastructure-independent vehicle networks. Future extensions of this work will explore hybrid authentication models that combine the efficiency of centralization with the robustness of decentralized approaches.

References

1. Miller J. Vehicle-to-vehicle-to-infrastructure (V2V2I) intelligent transportation system architecture. *Proc. of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, 2008, pp. 715–720. https://doi.org/10.1109/ivs.2008.4621301
2. Bagga P., Das A.K., Wazid M., Rodrigues J.J.P.C., Park Y. Authentication protocols in Internet of Vehicles: taxonomy, analysis, and challenges. *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 54314–54344. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2981397
3. Cheng X., Yang L., Shen X. D2D for intelligent transportation systems: a feasibility study. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2015, vol. 16, no. 4, pp. 1784–1793. https://doi.org/10.1109/TITS.2014.2377074
4. Lo N.-W., Tsai J.-L. An efficient conditional privacy-preserving authentication scheme for vehicular sensor networks without pairings. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2016, vol. 17, no. 5. pp. 1319–1328. https://doi.org/10.1109/TITS.2015.2502322
5. Nandy T., Idris M.Y.I., Noor R.M., Wahab A.W.A., Bhattacharyya S., Kolandaisamy R., Yahuza M. A secure, privacy-preserving, and lightweight authentication scheme for VANETs. *IEEE Sensors Journal*, 2021, vol. 21, no. 18, pp. 20998–21011. https://doi.org/10.1109/JSEN.2021.3097172
6. Manivannan D., Moni S.S., Zeadally S. Secure authentication and privacy-preserving techniques in Vehicular Ad-hoc NETworks (VANETs). *Vehicular Communications*, 2020, vol. 25, pp. 100247. https://doi.org/10.1016/j.vehcom.2020.100247
7. Jan S.A., Amin N.U., Othman M., Ali M., Umar A.I., Basir A. A survey on privacy-preserving authentication schemes in VANETs: attacks, challenges and open issues. *IEEE Access*, 2021, vol. 9, pp. 153701–153726. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3125521
8. Ying B., Nayak A. Anonymous and lightweight authentication for secure vehicular networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2017, vol. 66, no. 12, pp. 10626–10636. https://doi.org/10.1109/TVT.2017.2744182
9. Saxena N., Choi B.J., Cho S. Lightweight privacy-preserving authentication scheme for V2G networks in the smart grid. *Proc. of the IEEE Trustcom/BigDataSE/ISPA*, 2015, pp. 604–611. https://doi.org/10.1109/Trustcom.2015.425
10. Lee J., Kim G., Das A.K., Park Y. Secure and efficient honey list-based authentication protocol for Vehicular Ad Hoc Networks. *IEEE Transactions on Network Science and Engineering*, 2021,

Литература

1. Miller J. Vehicle-to-vehicle-to-infrastructure (V2V2I) intelligent transportation system architecture // Proc. of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium. 2008. P. 715–720. https://doi.org/10.1109/ivs.2008.4621301
2. Bagga P., Das A.K., Wazid M., Rodrigues J.J.P.C., Park Y. Authentication protocols in Internet of Vehicles: taxonomy, analysis, and challenges // IEEE Access. 2020. V. 8. P. 54314–54344. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2981397
3. Cheng X., Yang L., Shen X. D2D for intelligent transportation systems: a feasibility study // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. 2015. V. 16. N 4. P. 1784–1793. https://doi.org/10.1109/TITS.2014.2377074
4. Lo N.-W., Tsai J.-L. An efficient conditional privacy-preserving authentication scheme for vehicular sensor networks without pairings // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. 2016. V. 17. N 5. P. 1319–1328. https://doi.org/10.1109/TITS.2015.2502322
5. Nandy T., Idris M.Y.I., Noor R.M., Wahab A.W.A., Bhattacharyya S., Kolandaisamy R., Yahuza M. A secure, privacy-preserving, and lightweight authentication scheme for VANETs // IEEE Sensors Journal. 2021. V. 21. N 18. P. 20998–21011. https://doi.org/10.1109/JSEN.2021.3097172
6. Manivannan D., Moni S.S., Zeadally S. Secure authentication and privacy-preserving techniques in Vehicular Ad-hoc NETworks (VANETs) // Vehicular Communications. 2020. V. 25. P. 100247. https://doi.org/10.1016/j.vehcom.2020.100247
7. Jan S.A., Amin N.U., Othman M., Ali M., Umar A.I., Basir A. A survey on privacy-preserving authentication schemes in VANETs: attacks, challenges and open issues // IEEE Access. 2021. V. 9. P. 153701–153726. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3125521
8. Ying B., Nayak A. Anonymous and lightweight authentication for secure vehicular networks // IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2017. V. 66. N 12. P. 10626–10636. https://doi.org/10.1109/TVT.2017.2744182
9. Saxena N., Choi B.J., Cho S. Lightweight privacy-preserving authentication scheme for V2G networks in the smart grid // Proc. of the IEEE Trustcom/BigDataSE/ISPA. 2015. P. 604–611. https://doi.org/10.1109/Trustcom.2015.425
10. Lee J., Kim G., Das A.K., Park Y. Secure and efficient honey list-based authentication protocol for Vehicular Ad Hoc Networks // IEEE Transactions on Network Science and Engineering. 2021. V. 8. N 3. P. 2412–2425. https://doi.org/10.1109/TNSE.2021.3093435

vol. 8, no. 3, pp. 2412–2425. https://doi.org/10.1109/TNSE.2021.3093435
11. Li S., Yang R., Chen J. A privacy-preserving authentication scheme for VANETs with exculpability. *Security and Communication Networks*, 2023, vol. 2023, no. 1, pp. 8676929. https://doi.org/10.1155/2023/8676929
12. Parmar K., Patil S., Patel D., Patel V., Parikh B., Padaria P. Privacy-preserving authentication scheme for VANETs using blockchain technology. *Procedia Computer Science*, 2023, vol. 220, pp. 40–47. https://doi.org/10.1016/j.procs.2023.03.008
13. Vasudev H., Deshpande V., Das D., Das S.K. A lightweight mutual authentication protocol for V2V communication in internet of vehicles. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020, vol. 69, no. 6, pp. 6709–6717. https://doi.org/10.1109/TVT.2020.2986585
14. Zhou L., Chao H.C. Multimedia traffic security architecture for the internet of things. *IEEE Network*, 2011, vol. 25, no. 3, pp. 35–40. https://doi.org/10.1109/MNET.2011.5772059
15. Burrows M., Abadi M., Needham R. A logic of authentication. *ACM Transactions on Computer Systems*, 1990, vol. 8, no. 1, pp. 18–36. https://doi.org/10.1145/77648.77649
16. Mun H., Han K., Lee Y.S., Yeun C.Y., Choi H.H. Enhanced secure anonymous authentication scheme for roaming service in global mobility networks. *Mathematical and Computer Modelling*, 2012, vol. 55, no. 1–2, pp. 214–222. https://doi.org/10.1016/j.mcm.2011.04.036
17. Zhao D., Peng H., Li L., Yang Y. A secure and effective anonymous authentication scheme for roaming service in global mobility networks. *Wireless Personal Communications*, 2014, vol. 78, no. 1, pp. 247–269. https://doi.org/10.1007/s11277-014-1750-y
18. Cui J., Yu J., Zhong H., Wei L., Liu L. Chaotic map-based authentication scheme using physical unclonable function for internet of autonomous vehicle. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2023, vol. 24, no. 3, pp. 3167–3181. https://doi.org/10.1109/TITS.2022.3227949

11. Li S., Yang R., Chen J. A privacy-preserving authentication scheme for VANETs with exculpability // Security and Communication Networks. 2023. V. 2023. N 1. P. 8676929. https://doi.org/10.1155/2023/8676929
12. Parmar K., Patil S., Patel D., Patel V., Parikh B., Padaria P. Privacy-preserving authentication scheme for VANETs using blockchain technology // Procedia Computer Science. 2023. V. 220. P. 40–47. https://doi.org/10.1016/j.procs.2023.03.008
13. Vasudev H., Deshpande V., Das D., Das S.K. A lightweight mutual authentication protocol for V2V communication in internet of vehicles // IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2020. V. 69. N 6. P. 6709–6717. https://doi.org/10.1109/TVT.2020.2986585
14. Zhou L., Chao H.C. Multimedia traffic security architecture for the internet of things // IEEE Network. 2011. V. 25. N 3. P. 35–40. https://doi.org/10.1109/MNET.2011.5772059
15. Burrows M., Abadi M., Needham R. A logic of authentication // ACM Transactions on Computer Systems. 1990. V. 8. N 1. P. 18–36. https://doi.org/10.1145/77648.77649
16. Mun H., Han K., Lee Y.S., Yeun C.Y., Choi H.H. Enhanced secure anonymous authentication scheme for roaming service in global mobility networks // Mathematical and Computer Modelling. 2012. V. 55. N 1–2. P. 214–222. https://doi.org/10.1016/j.mcm.2011.04.036
17. Zhao D., Peng H., Li L., Yang Y. A secure and effective anonymous authentication scheme for roaming service in global mobility networks // Wireless Personal Communications. 2014. V. 78. N 1. P. 247–269. https://doi.org/10.1007/s11277-014-1750-y
18. Cui J., Yu J., Zhong H., Wei L., Liu L. Chaotic map-based authentication scheme using physical unclonable function for internet of autonomous vehicle // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. 2023. V. 24. N 3. P. 3167–3181. https://doi.org/10.1109/TITS.2022.3227949

Authors

Muhammad Salman Saeed — PhD Student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, SC 57886147100, https://orcid.org/0009-0006-1425-4863, salman.saeed@itmo.ru
Sergey V. Bezzateev — D.Sc., Associate Professor, Head of Department, Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation (SUAI), Saint Petersburg, 190000, Russian Federation; Director of Laboratory, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, SC 6602425996, https://orcid.org/0000-0002-0924-6221, bsv@guap.ru

Авторы

Саид Мухаммад Салман — аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, SC 57886147100, https://orcid.org/0009-0006-1425-4863, salman.saeed@itmo.ru
Беззатеев Сергей Валентинович — доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, 190000, Российская Федерация; директор лаборатории, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, SC 6602425996, https://orcid.org/0000-0002-0924-6221, bsv@guap.ru

Received 13.04.2025
Approved after reviewing 01.07.2025
Accepted 22.07.2025

Статья поступила в редакцию 13.04.2025
Одобрена после рецензирования 01.07.2025
Принята к печати 22.07.2025

Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ
июль–август 2025 Том 25 № 4 http://ntv.ifmo.ru/
SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL OF INFORMATION TECHNOLOGIES, MECHANICS AND OPTICS
Jule–August 2025 Vol. 25 No 4 http://ntv.ifmo.ru/en/
ISSN 2226-1494 (print) ISSN 2500-0373 (online)

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

MODELING AND SIMULATION

doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-4-762-770
УДК 004.75

Имитационно-аналитическая модель надежности с возможной репликацией передач в реконфигурируемой многопутевой беспроводной сети

Евгения Александровна Абрамова[1], Владимир Анатольевич Богатырев[2]✉

[1,2] Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация
[2] Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, 190000, Российская Федерация

[1] Vectra4444@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-5637-7427,
[2] vladimir.bogatyrev@gmail.com✉, https://orcid.org/0000-0003-0213-0223

Аннотация

Введение. Рассмотрены методы обеспечения и оценки надежности беспроводных реконфигурируемых многопутевых сетей. Отказоустойчивость многопутевых беспроводных сетей поддерживается с помощью ограниченного числа связанных между собой коммутационных узлов-переключателей, позволяющих проводить реконфигурацию при перераспределении трафика через сохранившие связанность сегменты путей. Целью работы является повышение надежности передачи данных в многопутевых беспроводных сетях. Надежность достигается в результате обоснования выбора места расположения переключателей маршрутов с учетом влияния на вероятности доставки пакетов отказов коммутационных узлов и комбинаций различных препятствий распространения сигналов по совокупности путей связи с адресуемым узлом. Для сравнения решений построения сети предлагается модель, отражающая влияние на надежность передач месторасположения узлов переключателей путей. **Метод.** Исследование надежности беспроводной многопутевой сети основывается на сочетании аналитического и имитационного моделирований. Оценка надежности сети предполагает ее декомпозицию с учетом возможных комбинаций отказов узлов переключателей путей и их влияния на возможности реконфигурации в результате переключения сегментов путей, сохранивших после отказов связанность входящих в их состав узлов. Оценка вероятности потери пакетов при передаче по беспроводным каналам осуществляется в результате имитационного моделирования с использованием инструментальных средств OMNeT++. Предлагаемый подход позволяет совместить оценки надежности структуры сети и процесса передачи данных (доставки пакетов) через нее с учетом отказов узлов, а также постоянных и меняющихся препятствий (условий) распространения сигналов между узлами. **Основные результаты.** Проанализированы возможности повышения надежности беспроводных сетей с многопутевой маршрутизацией в результате оптимизации размещения ограниченного числа узлов межпутевого переключения передач. Предложена имитационно-аналитическая модель надежности беспроводных реконфигурируемых многопутевых сетей, которая учитывает при оценке вероятности доставки пакетов, отказы коммуникационных узлов и потери пакетов при вариациях расположения физических препятствий прохождения сигналов между узлами. Показано, что выбор размещения узлов межпутевого переключения существенно влияет на надежность доставки пакетов. При этом существует оптимальное размещение переключателей, обеспечивающее в зависимости от распределения по путям препятствий передачи сигналов максимум надежности передач. **Обсуждение.** Результаты исследования могут быть применены при прогнозировании надежности и обосновании проектных решений построения отказоустойчивых многопутевых реконфигурируемых беспроводных сетей. В дальнейшем предполагается рассмотреть более сложные топологии сетей с учетом влияния реконфигурации на надежность и на задержки доставки пакетов.

Ключевые слова

надежность, многопутевая маршрутизация, отказоустойчивость, реконфигурация, OMNeT++, беспроводная сеть

Ссылка для цитирования: Абрамова Е.А., Богатырев В.А. Имитационно-аналитическая модель надежности с возможной репликацией передач в реконфигурируемой многопутевой беспроводной сети // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2025. Т. 25, № 4. С. 762–770. doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-4-762-770

© Абрамова Е.А., Богатырев В.А., 2025

Simulation and analytical model of reliability with possible replication of transmissions in a reconfigurable multipath wireless network

Evgeniya A. Abramova[1], Vladimir A. Bogatyrev[2]✉

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

[2] Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation (SUAI), Saint Petersburg, 190000, Russian Federation

[1] Vectra4444@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-5637-7427

[2] vladimir.bogatyrev@gmail.com✉, https://orcid.org/0000-0003-0213-0223

Abstract

Methods for ensuring and evaluating the reliability of wireless reconfigurable multipath networks are considered. The fault tolerance of multipath wireless networks is maintained using a limited number of interconnected switching nodes which allow reconfiguration when traffic is redistributed through the connected path segments. The aim of the work is to increase the reliability of transmissions in multipath wireless networks as a result of justifying the choice of route switches, taking into account the impact on the probability of packet delivery of both failures of switching nodes and combinations of various obstacles to signal propagation along a set of communication paths with the addressable node. To compare network construction solutions, a model is proposed that reflects the influence of the location of path switch nodes on transmission reliability. The study of the reliability of a wireless multipath network is based on a combination of analytical and simulation modeling. An assessment of network reliability involves its decomposition, taking into account possible combinations of failures of path switch nodes and their impact on reconfiguration capabilities as a result of switching path segments that have retained the connectivity of their constituent nodes after failures. The probability of packet loss during transmission over wireless channels is estimated as a result of simulation using OMNeT++ tools. The proposed approach makes it possible to combine estimates of the reliability of the network structure and the process of data transmission (packet delivery) through it, taking into account node failures as well as constant and changing obstacles (conditions) of signal propagation between nodes. The possibilities of increasing the reliability of wireless networks with multipath routing are analyzed as a result of optimizing the placement of a limited number of inter-path gearshift nodes. A simulation and analytical model of the reliability of wireless reconfigurable multipath networks is proposed, which takes into account failures of communication nodes and packet losses with variations in the location of physical obstacles to signal transmission between nodes when assessing the probability of packet delivery. It is shown that the choice of the location of the inter-path switching nodes significantly affects the reliability of packet delivery, while there is an optimal placement of switches, which ensures maximum transmission reliability depending on the distribution of signal transmission obstacles along the paths. The results of the study can be applied in predicting reliability and substantiating design solutions for building fault-tolerant multipath reconfigurable wireless networks. In the future, it is expected to consider more complex network topologies, taking into account the impact of reconfiguration on both reliability and packet delivery delays.

Keywords

reliability, multipath routing, fault tolerance, reconfiguration, OMNeT++, wireless network

For citation: Abramova E.A., Bogatyrev V.A. Simulation and analytical model of reliability with possible replication of transmissions in a reconfigurable multipath wireless network. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2025, vol. 25, no. 4, pp. 762–770 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-4-762-770

Введение

Высокая надежность распределенных систем возможна при организации связи через избыточную многопутевую сеть с оптимизацией маршрутов и их реконфигурацией при накоплении отказов. В соответствии с концепцией реконфигурируемых сетей Software-Defined Networking предусматривается возможность динамической реконфигурации сети в реальном времени [1, 2], гарантируя, что критически важные потоки, такие как сверхнадежные коммуникации с малой задержкой, получат необходимые ресурсы без снижения допустимого уровня обслуживания других потоков [3]. В работе [4] проанализировано влияние размещения коммутационных узлов на частоту коллизий и помех при передаче данных. Эффективность использования избыточности многопутевых сетей во многом зависит от организации маршрутизации, адаптивной к изменениям трафика, и связанности сети из-за накопления отказов коммутационных узлов. Среди активно применяющихся методов многопутевой маршрутизации выделяется метод на основе алгоритма Route Optimization and Service Assurance (ROSA), который оптимизирует сетевые пути для классов трафиков Deterministic Networking и Scheduled [5, 6], что обеспечивает передачу потоков с высоким приоритетом по путям с минимальными задержками и низкими потерями. Алгоритм ROSA, перераспределяя потоки по кратчайшим маршрутам, позволяет снизить потребление энергии без ущерба для производительности [7]. В то же время он требует высокой вычислительной мощности для оптимизации маршрутов в реальном времени и сильно зависим от централизованного контроллера, приводящего к риску единой точки отказа. В связи с этим алгоритм ROSA уязвим для кибератак [8] и может отрицательно влиять на надежность сети. Для беспроводных сетей снижение энергопотребления может достигаться при кластеризации, когда множество узлов сети разбивается на кластеры с назначением в каждом из них головного узла, осуществляющего связь внутри кластера и между кластерами [9–13].

Для многопутевых сетей важным является обоснование структурных решений обеспечения их надежности [14–16]. В работах [17–20], рассмотрены дополнительные возможности обеспечения надежности и

своевременности передач пакетов в многопутевых сетях, связанные с оптимальными сегментацией и кратностью репликацией пакетов в зависимости от предельно допустимой задержки их доставки адресату.

Повышение надежности и отказоустойчивости проводных многопутевых сетей при реконфигурации, позволяющей сформировать новые маршруты из сохранивших связанность после отказов сегментов первоначальных путей, исследовано в [21, 22]. Переключение маршрутов реализуется с помощью ограниченного числа связанных между собой коммутационных узлов-переключателей, позволяющих проводить реконфигурацию при формировании обходных маршрутов, используя сохранившие связанность сегменты путей. Для многопутевых проводных сетей место размещения ограниченного числа коммуникационных узлов, осуществляющих перераспределение потоков при реконфигурации [21, 22], существенно влияет на надежность и производительность сети.

Целью настоящей работы является исследование возможностей повышения надежности многопутевых беспроводных сетей в зависимости от выбора месторасположения переключателей маршрутов с учетом влияния на вероятности доставки пакетов адресату как отказов коммутационных узлов, так и расположения препятствий распространения сигналов по различным путям связи с адресуемым узлом.

Исследование надежности беспроводной многопутевой сети предлагается провести при сочетании аналитического и имитационного моделирований. Оценка надежности сети опирается на ее декомпозицию с учетом возможных комбинаций отказов узлов переключателей путей и их влияние на возможности реконфигурации с переключением сегментов путей, сохранивших после отказов работоспособность составляющих их узлов. Оценка вероятности потери пакетов при передаче по беспроводным каналам учитывается отдельно в результате имитационного моделирования при различных условиях распространения сигналов. Аналитическую модель структурной надежности в сочетании с результатами имитационного моделирования по оценке вероятности потери пакетов при связи между соседними узлами предлагается использовать при оценке надежности (вероятности успешности) передач от источников пакетов до адресатов. Имитационное моделирование проводится с использованием инструментальных средств OMNeT++ [23].

Предлагаемый подход позволяет совместить оценки структурной надежности сети и надежности процесса передачи данных (доставки пакетов) через нее с учетом структурных отказов узлов, а также постоянных и меняющихся препятствий (условий) распространения сигналов во времени и в пространстве (между различными парами коммутационных узлов), влияющих на вероятность потери пакетов.

Модель надежности беспроводной сети

Структура исследуемой многопутевой сети показана на рис. 1. В сети выделены два базовых пути связи с адресуемым узлом. Будем считать, что верхний и нижний пути включают одинаковое число коммутационных узлов n. В сети имеется пара узлов-переключателей маршрутов (реконфигураторов), позволяющих перенаправлять потоки запросов между двумя базовыми путями. Общее число узлов, входящих в каждый путь, с учетом переключателя составляет $n + 1$. Число узлов до узла-переключателя путей равно n_1, а от переключателя до узла адресата (сервера) равно $n - n_1$.

Ставится задача оценки влияния места расположения коммутационных узлов, связывающих разные пути, на надежность сети с учетом физических отказов коммутационных узлов и надежности передач пакетов между парами связанных между собой узлов, составляющих пути. Источники запросов в зависимости от местоположения могут подключаться к одному из двух путей и к обоим одновременно, что обусловлено попаданием сигнала в зону базовых станций. Исследование надежности сети проведено при сочетании аналитической и имитационной моделей. Имитационное моделирование проводится при различных условиях распространения сигналов и привязке расположения узлов на местности.

При моделировании в среде OMNeT++ для каждого узла указывается его местоположение и тип (AomdvRouter). Тип узла показывает, какой базовый модуль будет использоваться при его моделировании, например Adhochost, WirelessHost, Router, StandartHost и другие.

Модуль AomdvRouter использует весь функционал обычного IP-хоста: стек TCP/IP, UDP, интерфейсы, и т. д. Параметр isRetranslator позволяет задавать логику ретрансляции для узлов-переключателей, а подмодулем маршрутизации выбран базовый модуль AODV. Узел-маршрутизатор подключается к транспортному уровню для корректной передачи сообщений между уровнями стека и организации двухсторонней связи внутри узла. На рис. 2 показана схема модуля AomdvRouter в виде связанных между собой компонентов сети.

Для генерации UDP-трафика в модели используется модуль UdpBasicApp. Пакеты размером 512 Б отправляются с периодичностью 1 с. Имя пакета ControlData позволяет собирать статистику по количеству отправленных, доставленных и потерянных пакетов. Конфигурация источника запросов задается в виде:

```
*.host*.numApps = 1
*.host*.app[0].typename = "UdpBasicApp"
*.host*.app [0].destAddresses = "10.0.020"
*.host*.app [0].destPost = 1000
*.host*.app [0].messageLength = 512 byte
*.host*.app [0].sendInterval = 1 s
*.host*.app [0].packetName = "ControlData"
```

Для приемника применен модуль UdpSink — стандартный компонент из библиотеки INET, предназначенный для получения UDP-пакетов. Он позволяет принимать входящие пакеты на заданном порту, а также может собирать статистику по общему количеству принятых сообщений и временным интервалам между передачами, что дает возможность определить доли доставленных пакетов и измерить среднюю задержку.

Узлы в модели располагаются на определенном расстоянии (160 м) друг от друга, чтобы пакеты передавались только между каждыми двумя соседними

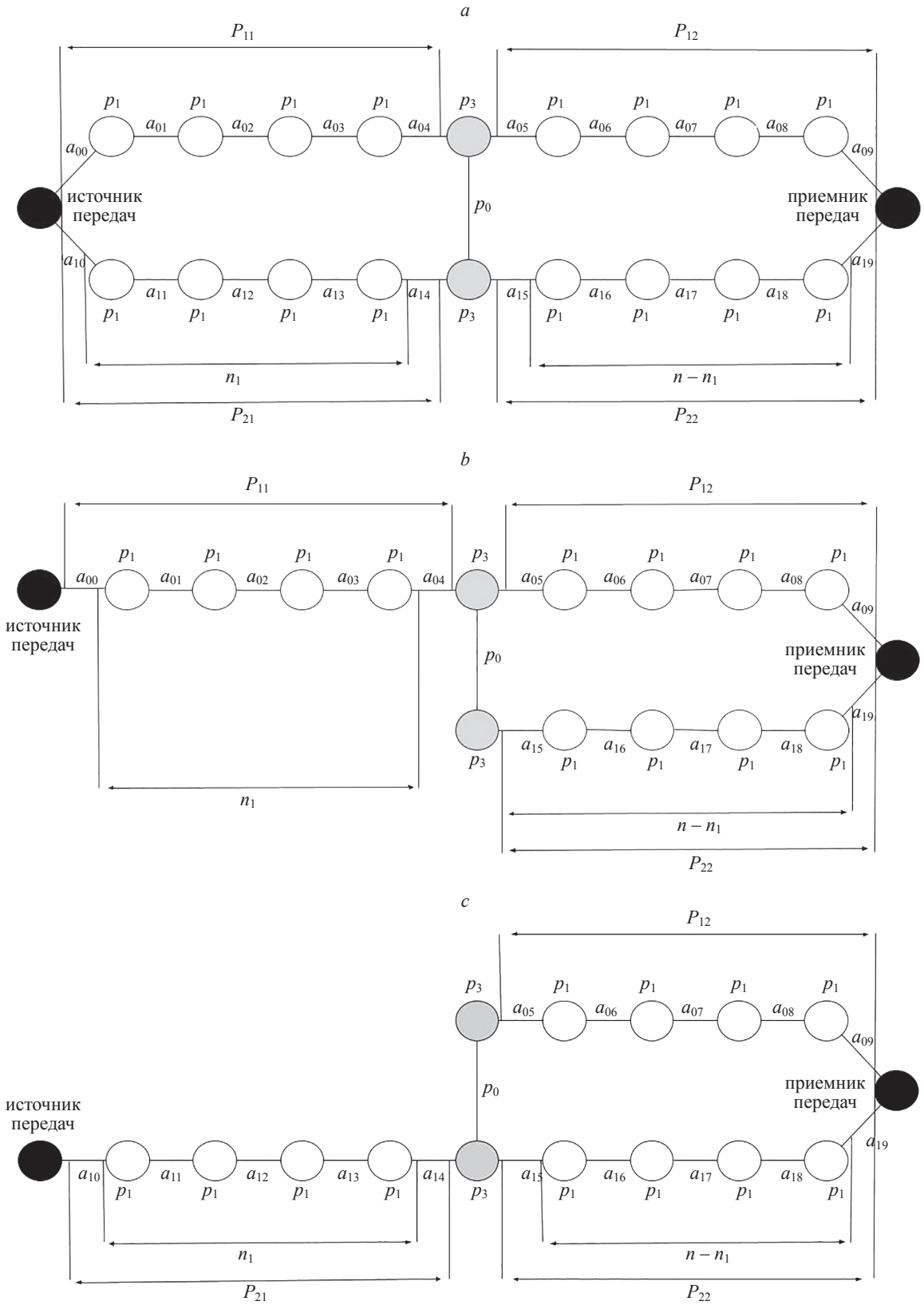


Рис. 1. Варианты связи источника и приемника передач.

P_{11}, P_{12}, P_{21}, P_{22} — вероятности успешной доставки пакетов через соответствующие сегменты сети; a_{00}–a_{19} — вероятности передачи пакетов между узлами; p_0 — вероятность успешности передач пакета между двумя переключателями; p_1 — надежность коммуникационного узла; p_3 — надежность узла переключателя

Fig. 1. Communication options for the transmission source and receiver.

P_{11}, P_{12}, P_{21}, P_{22} — probabilities of successful delivery of packets through the corresponding network segments; a_{00}–a_{19} — probabilities of packet transmission between nodes; p_0 — probability of successful transmission of a packet between two switches; p_1 — reliability of the communication node; p_3 — reliability of the switch node

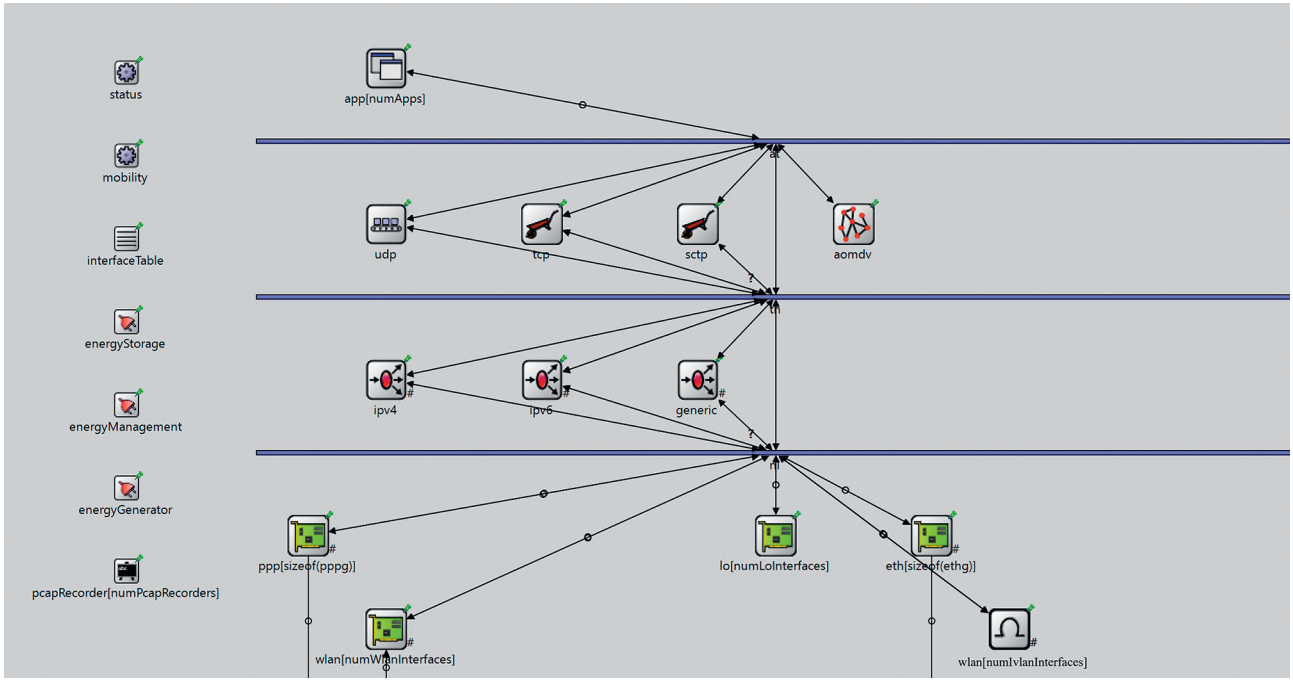


Рис. 2. Представление AomdvRouter в OMNeT++

Fig. 2. Representation of AomdvRouter in OMNeT++

узлами одной линии и имели возможность перейти на другую линию только на узлах-ретрансляторах. Это ограничение в модели учтено при помощи специальных модулей, которые позволяют имитировать особенности распространения сигнала.

Ограничения при передаче сигнала задаются с помощью параметров communicationRange, interferenceRange и detectionRange, которые позволяют повысить точность моделирования беспроводной связи. Диапазон связи (communicationRange) — это расстояние, на котором передача данных будет успешна. Диапазон помех (interferenceRange) — область, в которой передача может создавать помехи для других устройств, приводить к ошибкам и снижению эффективности передачи данных. За пределами этого диапазона передачи данных не влияют на другие узлы и не препятствуют их работе. Диапазон обнаружения (detectionRange) — область, где сигнал передачи может быть обнаружен, но недостаточно силен для успешного декодирования данных.

Значения этих параметров в модели:

**.radio.transmitter.communicationRange = 180 m

**.radio.transmitter.interferenceRange = 400 m

**.radio.transmitter.detectionRange = 800 m

Для исследуемой сети вероятность доставки пакетов от источников, подключенных только к одному верхнему (P_2) или нижнему (P_3) пути, при возможной репликации передач по сегментам, связывающих узлы переключатели с адресатом, вычисляется как:

$$P_2 = P_{11}\left[p_3^2 p_0(1-(1-P_{12})(1-P_{22})) + p_3(1-p_0p_3)P_{12}\right],$$

$$P_3 = P_{21}\left[p_3^2 p_0(1-(1-P_{12})(1-P_{22})) + p_3(1-p_0p_3)P_{22}\right].$$

Для источников, которые могут быть подключены как к первому, так и ко второму пути:

$$P_1 = p_3^2 p_0(1-(1-P_{11})(1-P_{21}))(1-(1-P_{12})(1-P_{22})) +$$
$$+ p_3^2(1-p_0)(1-(1-P_{11}P_{12})(1-P_{21}P_{22})) +$$
$$+ 2p_3(1-P_3)((P_{11}P_{12}+P_{21}P_{22}).$$

При этом $P_{11} = p_1^{n_1}P_{011}$, $P_{21} = p_1^{n_1}P_{021}$, $P_{12} = p_1^{n-n_1}P_{012}$, $P_{22} = p_1^{n-n_1}P_{022}$, где P_{011}, P_{012}, P_{021}, P_{022} — вероятности доставки пакетов в каждом из сегментов, получаемые в результате имитационного эксперимента.

Если узлы переключатели маршрутов связаны между собой через группу n_0 последовательно соединенных коммутационных узлов, то $p_0 = (p_1a_0)^{n_0}$, a_0 — вероятность передачи пакетов между соседними коммутационными узлами.

При неоднородности препятствий между соседними узлами вероятности передач между узлами по двум основным путям характеризуются матрицей $\|a_{i,j}\|_{2\times(n+2)}$, по которой:

$$P_{11} = p_1^{n_1}\prod_{j=0}^{n_1} a_{0,j},\ P_{12} = p_1^{n-n_1}\prod_{j=n_1}^{n+1} a_{0,j},$$

$$P_{21} = p_1^{n_1}\prod_{j=0}^{n_1} a_{1,j},\ P_{22} = p_1^{n-n_1}\prod_{j=n_1}^{n+1} a_{1,j}.$$

В качестве обобщающего критерия надежности передач используется средняя вероятность доставки пакета адресату: $P = P_1a_1 + P_2a_2 + P_3a_3$, где a_1, a_2, a_3 — доли трафика от источников, подключенных к первому, второму и обоим путям, $a_1 + a_2 + a_3 = 1$.

Расчет проведен при $n = 20$ узлах, составляющих каждый путь, при интенсивности отказов $\lambda = 10^{-4}$ 1/ч и интенсивности восстановления $\mu = 0{,}1$ 1/ч. Надежность узлов определяется по коэффициенту готовности: $p_1 = p_3 = \mu/(\lambda+\mu)$.

Для определения задержки и ослабления сигнала с учетом препятствий распространения электромагнитных волн в диэлектрических средах при моделировании в OMNeT++ (INET) использован класс DielectricObstacleLoss.

Экспериментальная оценка вероятности успешной доставки пакетов

Результаты оценки вероятности P успешной доставки пакетов адресату в зависимости от числа узлов n_1 до узла-переключателя с учетом возможных отказов узлов представлены на рис. 3, на котором семейство кривых, отражает зависимость вероятности доставки $P(n_1, a_3, a_1, a_2)$. Расчеты проведены при $P_{011} = 0{,}998$, $P_{012} = 0{,}992$, $P_{021} = 0{,}995$, $P_{011} = 0{,}989$ вероятностях доставки пакетов в сегментах путей в модели без препятствий (определяемые при имитационном моделировании).

В следующем эксперименте смоделировано распространение сигнала в беспроводной сети с учетом расположения узлов второго пути среди хвойного леса. Каждый участок леса моделируется как область с радиусом 35 м, расположенная между каждой парой узлов на одном пути (рис. 4). Значение dielectricLossTangent для каждой области препятствий принимается равным 0,8 дБ/м, значение propagationSpeed — $2{,}2 \cdot 10^8$ м/с. Полученные с помощью имитационной модели вероятности доставки пакетов для сегментов путей: $P_{011} = 0{,}998$, $P_{012} = 0{,}997$, $P_{021} = 0{,}992$, $P_{022} = 0{,}97$.

Расчеты, выполненные с учетом передач в условиях тумана и в городской среде, подтверждают установленный вид зависимостей вероятности доставки пакетов от числа узлов до переключателей путей.

Представленные расчеты показывают существование оптимального расположения узлов переключателей, при котором достигается максимальная надежность по доставке пакетов адресату. Выбор наилучшего расположения переключателей зависит от характеристик окружающей среды, в том числе погодных условий и наличия физических препятствий. Следует заметить, что при выборе стационарного размещения узлов переключателей в основном должны быть учтены расположение постоянных препятствий, а погодные условия могут быть дополнительно учтены статистически при постановке задачи принятия решений в условия неопределенности.

Обсуждение результатов

Новизна исследований заключается в том, что на основе предложенной имитационно-аналитическая модели надежности беспроводных реконфигурируемых многопутевых сетей установлено влияние на связанность сети и надежность доставки пакетов месторасположения узлов переключателей путей. Исследование проведено с учетом возможных комбинаций отказов коммуникационных узлов и потери пакетов в зависимости от вариаций расположения препятствий, влияющих на прохождения сигналов между узлами.

Полученные результаты могут быть применены при прогнозировании надежности и обосновании проектных решений построения отказоустойчивых многопутевых реконфигурируемых беспроводных сетей.

В качестве дальнейшего развития работы предполагается рассмотреть более сложные топологии сетей с учетом влияния их реконфигурации как на надежность,

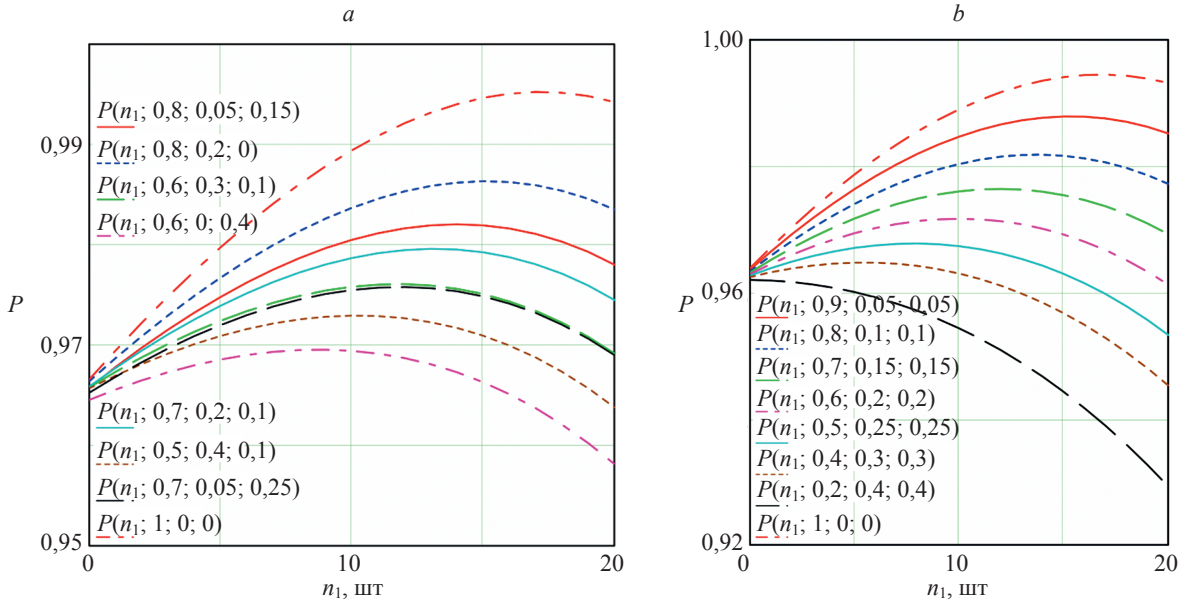


Рис. 3. Зависимости вероятностей доставки пакетов адресату P от числа узлов до переключателей маршрутов (n_1) при равномерном (a) и неравномерном (b) разделениях потоков между первым и вторым путями.

a_1, a_2, a_3 — доли пакетов, доступные для передачи от источника по двум путям, и только по первому или второму пути

Fig. 3. Dependence of the probability of packet delivery to the destination P vs. the number of nodes to route switches n_1 with uniform (a) and uneven (b) flow separation between the first and second paths.

a_1, a_2, a_3 — the proportion of packets available for transmission from a source along two paths, and only along the first or second path

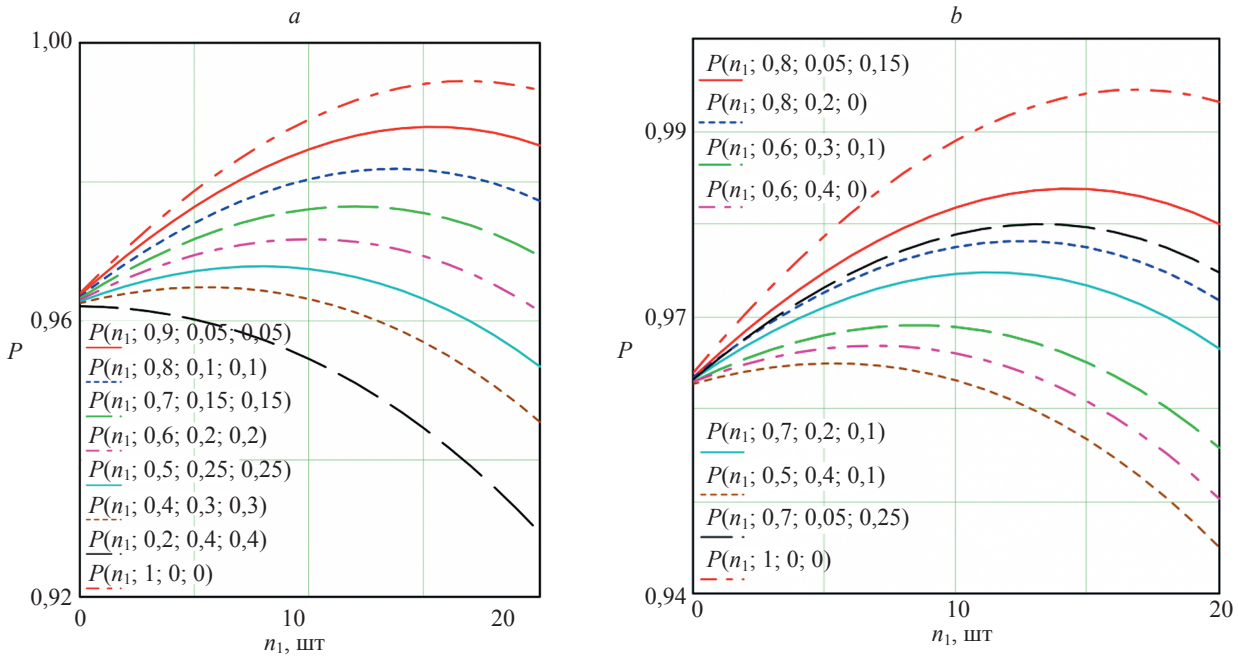


Рис. 4. Зависимости вероятностей доставки пакетов адресату *P* от числа узлов до переключателей сегментов и долей трафика a при равномерном (*a*) и неравномерным (*b*) разделениях потоков между первым и вторым путями при расположении части узлов в хвойном лесу

Fig. 4. Dependence of the probability of packet delivery to the addressee *P* vs. the number of nodes to the switches of segments and the shares of traffic a with uniform (*a*) and uneven (*b*) division of flows between the first and second paths when some of the nodes are in a coniferous forest

так и на энергопотребление узлов сети и задержки доставки пакетов.

Заключение

В работе проведено исследование возможностей повышения надежности беспроводных сетей с многопутевой маршрутизацией в результате оптимизации размещения ограниченного числа узлов межпутевого переключения передач.

Предложена имитационно-аналитическая модель надежности беспроводных реконфигурируемых многопутевых сетей, которая учитывает при оценке вероятности доставки пакетов адресату как отказы коммуникационных узлов, так и потери пакетов с учетом вариаций расположения физических препятствий прохождения сигнала.

При построении модели проанализировано влияние вариантов подключения источников передач как с полной, так и с ограниченной доступностью всех маршрутов связи с приемником в беспроводной сети.

Показано, что выбор размещения узлов межпутевого переключения существенно влияет на надежность доставки пакетов приемнику, при этом существует размещение переключателей, обеспечивающее, в зависимости от распределения по путям препятствий передачи сигналов, максимум надежности многопутевых передач.

Литература

1. Liu Y., Liu A., Liu X., Ma M. A trust-based active detection for cyber-physical security in industrial environments // IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2019. V. 15. N 12. P. 6593–6603. https://doi.org/10.1109/tii.2019.2931394
2. Njah Y., Cheriet M. Parallel route optimization and service assurance in energy-efficient software-defined industrial IoT networks // IEEE Access. 2021. V. 9. P. 24682–24696. https://doi.org/10.1109/tii.2019.2931394
3. Hashim A., Ayinde B.O., Abido M.A. Optimal placement of relay nodes in wireless sensor network using artificial bee colony algorithm // Journal of Network and Computer Applications. 2016. V. 64. P. 239–248. https://doi.org/10.1016/j.jnca.2015.09.013
4. Duraipandian M. Performance evaluation of routing algorithm for MANET based on the machine learning techniques // Journal of Trends in Computer Science and Smart Technology. 2019. V. 1. N 1. P. 24–35. https://doi.org/10.36548/jtcsst.2019.1.003

References

1. Liu Y., Liu A., Liu X., Ma M. A trust-based active detection for cyber-physical security in industrial environments. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2019, vol. 15, no. 12, pp. 6593–6603. https://doi.org/10.1109/tii.2019.2931394
2. Njah Y., Cheriet M. Parallel route optimization and service assurance in energy-efficient software-defined industrial IoT networks. *IEEE Access*, 2021, vol. 9, pp. 24682–24696. https://doi.org/10.1109/tii.2019.2931394
3. Hashim A., Ayinde B.O., Abido M.A. Optimal placement of relay nodes in wireless sensor network using artificial bee colony algorithm. *Journal of Network and Computer Applications*, 2016, vol. 64, pp. 239–248. https://doi.org/10.1016/j.jnca.2015.09.013
4. Duraipandian M. Performance evaluation of routing algorithm for MANET based on the machine learning techniques. *Journal of Trends in Computer Science and Smart Technology*, 2019, vol. 1, no. 1, pp. 24–35. https://doi.org/10.36548/jtcsst.2019.1.003

5. Zonouz A.E., Xing L., Vokkarane V.M., Sun Y.L. Reliability-oriented single-path routing protocols in wireless sensor networks // IEEE Sensors Journal. 2014. V. 14. N 11. P. 4059–4068. https://doi.org/10.1109/JSEN.2014.2332296
6. Netes V. Modern network technologies and dependability // Proc. of the 3rd International Scientific and Technical Conference Modern Computer Network Technologies (MoNeTeC). 2020. P. 104–113. https://doi.org/10.1109/monetec49726.2020.9258328
7. Chun J., Song J., Paulino G. System-reliability-based design and topology optimization of structures under constraints on first-passage probability // Structural Safety. 2019. V. 76. P. 81–94. https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2018.06.006
8. Rhim H., Tamine K., Abassi R., Sauveron D., Guemara S. A multi-hop graph-based approach for an energy-efficient routing protocol in wireless sensor networks // Human-centric Computing and Information Sciences. 2018. V. 8. P. 30. https://doi.org/10.1186/s13673-018-0153-6
9. Астахова Т.Н., Колбанёв М.О., Лямин А.С., Маслов Н.С., Маслова Д.А. Энергоэффективный алгоритм выбора маршрута передачи данных в беспроводных сенсорных сетях высокой плотности. Труды учебных заведений связи. 2024. Т. 10. № 4. С. 100–109. https://doi.org/10.31854/1813-324X-2024-10-4-100-109
10. Татарникова Т.М., Бимбетов Ф., Горина Е.В. Дополнение к алгоритму кластеризации беспроводной сенсорной сети // Программные продукты и системы. 2022. № 2. С. 222–228. https://doi.org/10.15827/0236-235X.138.222-228
11. Sadek R.A., Abd-alazeem D.M., Abbassy M.M. A new energy-efficient multi-hop routing protocol for heterogeneous wireless sensor networks // International Journal of Advanced Computer Science and Applications. 2021. V. 12. N 11. P. 481–491.
12. Татарникова Т.М., Бимбетов Ф., Горина Е.В. Алгоритм энергоэффективного взаимодействия узлов беспроводной сенсорной сети // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2022. Т. 22. № 2. С. 294–301. https://doi.org/10.17586/2226-1494-2022-22-2-294-301
13. Величко В.В., Попков Г.В., Попков В.К. Модели и методы повышения живучести современных систем связи. М.: Горячая линия–Телеком, 2014. 270 с.
14. Нетес В.А. Основы теории надежности. М.: Горячая линия–Телеком, 2024. 102 с.
15. Шувалов В.П., Егунов М.М., Минина Е.А. Обеспечение показателей надежности телекоммуникационных систем и сетей. М.: Горячая линия - Телеком, 2016. 168 с.
16. Bogatyrev V.A. Protocols for dynamic distribution of requests through a bus with variable logic ring for reception authority transfer // Automatic Control and Computer Sciences.1999. V. 33. N 1. P. 57–63.
17. Bogatyrev V.A., Bogatyrev A.V., Bogatyrev S.V. Multipath transmission of heterogeneous traffic in acceptable delays with packet replication and destruction of expired replicas in the nodes that make up the path // Communications in Computer and Information Science. 2023. V. 1748. P. 104–121. https://doi.org/10.1007/978-3-031-30648-8_9
18. Bogatyrev V.A., Bogatyrev S.V., Bogatyrev A.V. Control of multipath transmissions in the nodes of switching segments of reserved paths // Proc. of the 6th International Scientific Conference on Information, Control, and Communication Technologies (ICCT). 2022. P. 1–5. https://doi.org/10.1109/icct56057.2022.9976839
19. Bogatyrev S.V., Bogatyrev A.V., Bogatyrev V.A. Priority Maintenance with Replication of Wait-Critical Requests // Proc. of the Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF). 2021. P. 9470640. https://doi.org/10.1109/weconf51603.2021.9470640
20. Bogatyrev A.V., Bogatyrev V.A., Bogatyrev S.V. The probability of timely fully connected exchange in redundant real-time communication system // Proc. of the Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF). 2020. P. 9131517. https://doi.org/10.1109/weconf48837.2020.9131517
21. Bogatyrev V.A., Le A.T., Abramova E.A. Structural reliability of a multipath routing network with reconfigurations when switching routes // Proc. of the International Russian Automation Conference (RusAutoCon). 2022. P. 414–418. https://doi.org/10.1109/RusAutoCon54946.2022.9896286
22. Bogatyrev V.A., Le A.T., Abramova E.A. Reliability of multipath networks with optimization of the location of inter-path communication nodes // Proc. of the International Russian Smart

5. Zonouz A.E., Xing L., Vokkarane V.M., Sun Y.L. Reliability-oriented single-path routing protocols in wireless sensor networks. *IEEE Sensors Journal*, 2014, vol. 14, no. 11, pp. 4059–4068. https://doi.org/10.1109/JSEN.2014.2332296
6. Netes V. Modern network technologies and dependability. *Proc. of the 3rd International Scientific and Technical Conference Modern Computer Network Technologies (MoNeTeC)*, 2020, pp. 104–113. https://doi.org/10.1109/monetec49726.2020.9258328
7. Chun J., Song J., Paulino G. System-reliability-based design and topology optimization of structures under constraints on first-passage probability. *Structural Safety*, 2019, vol. 76, pp. 81–94. https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2018.06.006
8. Rhim H., Tamine K., Abassi R., Sauveron D., Guemara S. A multi-hop graph-based approach for an energy-efficient routing protocol in wireless sensor networks. *Human-centric Computing and Information Sciences*, 2018, vol. 8, pp. 30. https://doi.org/10.1186/s13673-018-0153-6
9. Astakhova T.N., Kolbanev M.O., Lyamin A.S., Maslov N.S., Maslova D.A. Energy-efficient algorithm for data path selection in high-density wireless sensor networks. *Proceedings of Telecommunication Universities*, 2024, vol. 10, no.4, pp. 100-109. (in Russian) https://doi.org/10.31854/1813-324X-2024-10-4-100-109
10. Tatarnikova T.M., Bimbetov F., Gorina E.V. An addition to the clustering algorithm of a wireless sensor network. *Software and Systems*, 2022, no. 2, pp. 222-228. (in Russian). https://doi.org/10.15827/0236-235X.138.222-228
11. Sadek R.A., Abd-alazeem D.M., Abbassy M.M. A new energy-efficient multi-hop routing protocol for heterogeneous wireless sensor networks. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 2021, vol. 12, no. 11, pp. 481–491.
12. Tatarnikova T.M., Bimbetov F., Gorina E.V. Algorithm for energy-efficient interaction of wireless sensor network nodes. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2022, vol. 22, no. 2, pp. 294–301. (in Russian). https://doi.org/10.17586/2226-1494-2022-22-2-294-301
13. Velichko V.V., Popkov G.V., Popkov V.K. *Models and Methods of Increasing the Survivability of Modern Communication Systems*. Moscow: Hotline–Telecom Publ., 2014, 270 p. (in Russian)
14. Netes V.A. *Fundamentals of Reliability Theory*. Moscow: Hotline–Telecom Publ., 2024, 102 p. (in Russian)
15. Shuvalov V.P., Egunov M.M., Minina E.A. *Ensuring Reliability Indicators of Telecommunication Systems and Networks*. Moscow: Hotline–Telecom Publ., 2016, 167 p. (in Russian)
16. Bogatyrev V.A. Protocols for dynamic distribution of requests through a bus with variable logic ring for reception authority transfer. *Automatic Control and Computer Sciences*,1999, vol. 33, no. 1, pp. 57–63.
17. Bogatyrev V.A., Bogatyrev A.V., Bogatyrev S.V. Multipath transmission of heterogeneous traffic in acceptable delays with packet replication and destruction of expired replicas in the nodes that make up the path. *Communications in Computer and Information Science*, 2023, vol. 1748, pp. 104–121. https://doi.org/10.1007/978-3-031-30648-8_9
18. Bogatyrev V.A., Bogatyrev S.V., Bogatyrev A.V. Control of multipath transmissions in the nodes of switching segments of reserved paths. *Proc. of the 6th International Scientific Conference on Information, Control, and Communication Technologies (ICCT)*, 2022, pp. 1–5. https://doi.org/10.1109/icct56057.2022.9976839
19. Bogatyrev A.V., Bogatyrev V.A., Bogatyrev S.V. The probability of timely fully connected exchange in redundant real-time communication system. *Proc. of the Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF)*, 2020, pp. 9131517. https://doi.org/10.1109/weconf48837.2020.9131517
20. Bogatyrev A.V., Bogatyrev V.A., Bogatyrev S.V. The probability of timely fully connected exchange in redundant real-time communication system. *Proc. of the Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF)*, 2020, pp. 9131517. https://doi.org/10.1109/weconf48837.2020.9131517
21. Bogatyrev V.A., Le A.T., Abramova E.A. Structural reliability of a multipath routing network with reconfigurations when switching routes. *Proc. of the International Russian Automation Conference (RusAutoCon)*, 2022, pp. 414–418. https://doi.org/10.1109/RusAutoCon54946.2022.9896286
22. Bogatyrev V.A., Le A.T., Abramova E.A. Reliability of multipath networks with optimization of the location of inter-path

Industry Conference (SmartIndustryCon). 2023. P. 449–453. https://doi.org/10.1109/smartindustrycon57312.2023.10110818
23. Хабаров С.П. Основы моделирования беспроводных сетей в среде OMNeT++. СПб: Лань, 2021. 260 с.

communication nodes. *Proc. of the International Russian Smart Industry Conference (SmartIndustryCon)*, 2023, pp. 449–453. https://doi.org/10.1109/smartindustrycon57312.2023.10110818
23. Khabarov S.P. *Fundamentals of Modeling Wireless Networks in the OMNeT++ Environment*. St. Petersburg: Lan Publishing House, 2021, 260 p. (in Russian)

Авторы

Абрамова Евгения Александровна — аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, SC 57221663902, https://orcid.org/0000-0002-5637-7427, Vectra4444@mail.ru

Богатырев Владимир Анатольевич — доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, 190000, Российская Федерация; профессор, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, SC 7006571069, https://orcid.org/0000-0003-0213-0223, vladimir.bogatyrev@gmail.com

Authors

Evgeniya A. Abramova — PhD Student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, SC 57221663902, https://orcid.org/0000-0002-5637-7427, Vectra4444@mail.ru

Vladimir A. Bogatyrev — D.Sc., Professor, Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation (SUAI), Saint Petersburg, 190000, Russian Federation; Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, SC 7006571069, https://orcid.org/0000-0003-0213-0223, vladimir.bogatyrev@gmail.com

Статья поступила в редакцию 17.05.2025
Одобрена после рецензирования 20.06.2025
Принята к печати 25.07.2025

Received 17.05.2025
Approved after reviewing 20.06.2025
Accepted 25.07.2025

Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ
июль–август 2025 Том 25 № 4 http://ntv.ifmo.ru/
SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL OF INFORMATION TECHNOLOGIES, MECHANICS AND OPTICS
Jule–August 2025 Vol. 25 No 4 http://ntv.ifmo.ru/en/
ISSN 2226-1494 (print) ISSN 2500-0373 (online)

doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-4-771-779
УДК 004.932.2

Оценка точности позиционирования трамвая в кривых на основе данных карты и сегментированных изображений

Бушра Али[1]✉, Ринат Наилевич Садеков[2]

[1,2] Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Москва, 119049, Российская Федерация
[2] АО «Когнитив», Москва, 634063, Российская Федерация

[1] bushrayehyaali@gmail.com✉, https://orcid.org/0000-0001-6895-1505
[2] r.sadekov@misis.ru, https://orcid.org/0000-0001-6286-358X

Аннотация

Введение. Предложен подход к оценке точности навигационных систем по информации датчиков технического зрения и данных цифровой карты. Цифровая карта задается в виде арочно-линейных сплайнов, аппроксимирующих осевую линию рельсового пути. Такой подход не требует использования навигационных спутниковых данных и актуален в задачах оценки качества навигационных решений для подвижных транспортных средств, эксплуатирующимися в городской среде. **Метод.** Предложенное решение основывается на идее сопоставления сегментированных изображений, содержащих рельсовый путь, с данными цифровой карты. В работе рассмотрены два способа сопоставления. Первый способ основан на сравнении областей с использованием метрики IoU, второй — на сравнении линий и расчета невязки между ними. В первом способе арочно-линейный сплайн маршрута проецируется в кадр изображения, выделяя область дороги по показаниям навигационной системы и цифровой карты. Во втором способе из области рельсового полотна на сегментированном изображении извлекается осевая линия, которая сравнивается со сплайном маршрута. Поскольку формируемые невязки в обоих случаях являются нелинейными, оценка ошибок навигационной системы осуществляется на основе фильтра частиц, где каждая частица определяет координаты и ориентацию «вероятного» местоположение трамвая. Оценка местоположения и ориентации трамвая осуществляется на основе взвешенного суммирования частиц: чем лучше согласуются данные измерений и синтезированных областей/линий, тем выше «вес» частицы. **Основные результаты.** Предложенная методика апробирована на модельных и реальных данных, собранных на трамвайных маршрутах в Санкт-Петербурге. Эксперименты показали, что первый способ обеспечивает более высокую точность. Это объясняется необходимостью постпроцессинга данных сегментированного изображения для выделения осевой линии рельсового пути и, как следствие, уменьшением полезной информации. Полученная зависимость точности определения навигационных параметров от радиуса кривизны дороги продемонстрировала снижение точности на кривых большего радиуса. **Обсуждение.** Экспериментально подтверждена применимость предложенного подхода для оценки навигационных ошибок, его устойчивость к изменению погодных условий и качеству дорожного покрытия. Предложенный в работе подход выгодно отличается простотой и доступностью данных. По сравнению с методами, основанными на лидарных данных, предложенный подход не требует наличия дорогих датчиков и трудоемкого процесса сопоставления лидарного облака с высокоточной картой. В отличие от методов, использующих техническое зрение, не требуется составления карты ориентиров, разработки сложной процедуры их идентификации и сопоставления.

Ключевые слова

оценка точности навигации, нейронная сеть, городская среда, средняя квадратическая погрешность, беспилотный транспорт

Ссылка для цитирования: Али Б., Садеков Р.Н. Оценка точности позиционирования трамвая в кривых на основе данных карты и сегментированных изображений // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2025. Т. 25, № 4. С. 771–779. doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-4-771-779

© Али Б., Садеков Р.Н., 2025

Evaluating tram positioning accuracy on curves based on map data and segmented images

Bushra Ali[1]✉, Rinat N. Sadekov[2]

[1,2] University of Science and Technology MISIS, Moscow, 119049, Russian Federation
[2] Cognitive JSC, Moscow, 634063, Russian Federation

[1] bushrayehyaali@gmail.com✉, https://orcid.org/0000-0001-6895-1505
[2] r.sadekov@misis.ru, https://orcid.org/0000-0001-6286-358X

Abstract

An approach is proposed for evaluating the accuracy of navigation systems using data from technical vision sensors and a digital map. The digital map is defined as arch-linear splines approximating the centerline of the railway track. This approach does not rely on satellite navigation data and is relevant for assessing the quality of navigation solutions for mobile transport vehicles operating in urban environments. The proposed approach is based on comparing segmented images containing railway tracks with digital map data. The study examines two comparison methods: the first based on comparing areas using the IoU metric, and the second based on comparing lines and calculating residuals between them. In the first method, the arch-linear spline of the route is projected onto the image frame, creating a road area based on navigation system readings and digital map data. In the second method, the centerline is extracted from the railway track area in the segmented image and compared with the route spline. Since the residuals generated in both cases are nonlinear, the evaluation of navigation system errors is performed using a particle filter, where each particle defines the coordinates and orientation of the "probable" location of the tram. The tram location and orientation are estimated based on the weighted summation of particles, with higher weights assigned to particles that better align measured data with synthesized areas or lines. The proposed methodology was tested on simulated and real data collected from tram routes in Saint Petersburg. Experiments demonstrated that the first method provides higher accuracy compared to the second, attributable to the need for post-processing segmented image data to extract the railway track centerline, which results in a loss of useful information. The study established a relationship between the accuracy of navigation parameter determination and the road curvature radius, showing a decrease in accuracy on curves with larger radii. The approach applicability for assessing navigation errors and its robustness to varying weather conditions and road surface quality were experimentally confirmed. The proposed approach stands out from known methods due to its simplicity and data accessibility. Compared to methods based on lidar data, it does not require expensive sensors or the labor-intensive process of aligning lidar point clouds with high-precision maps. Unlike methods using technical vision, it eliminates the need for creating landmark maps, developing complex identification procedures or matching processes.

Keywords

evaluating navigation accuracy, neural network, urban environment, root mean square error, autonomous transport

For citation: Ali B., Sadekov R.N. Evaluating tram positioning accuracy on curves based on map data and segmented images. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2025, vol. 25, no. 4, pp. 771–779 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-4-771-779

Введение

В последние годы системы помощи водителю [1, 2] и беспилотные автомобили [3] стали активно развиваться и внедряться в повседневную жизнь. По сравнению с полностью автономными системами, системы помощи водителю используют меньше датчиков, поскольку их задача — частичная автоматизация управления транспортным средством и предупреждение водителя об «опасных» ситуациях. Так, в настоящее время современные трамваи оснащаются системой помощи водителю [2]. Данные системы решают такие задачи как предупреждение аварийных ситуаций наезда на пешеходов или автомобили, распознавание сигналов светофора и запрет проезда перекрестка на «красный» сигнал светофора, соблюдение требуемой скорости движения на маршруте движения. Для решения перечисленных задач необходимо обеспечивать высокую точность позиционирования. Как правило, эти системы полагаются на навигационные спутниковые данные, системы технического зрения, инерциальные модули и одометрические датчики [4]. Показания спутниковой навигационной системы играют важную роль в определении местоположения транспортного средства [5], однако спутниковый сигнал часто оказывается ненадежным в городских условиях по причинам недоступности сигнала в туннелях и узких улицах, использования средств подавления сигнала, а также проблемах многолучевости [6], когда спутниковый сигнал отражается от поверхностей зданий и других объектов, что приводит к возникновению ложных сигналов и значительному снижению точности позиционирования.

При эксплуатации систем помощи водителю важно быстро и оперативно диагностировать аппаратные и программные проблемы, новые дорожные и эксплуатационные ситуации. Для их решения необходим широкий набор алгоритмов, способных использовать различные комбинации данных для оценки качества работы любой подсистемы, включая и навигационную. С этих позиций разработка подходов, обеспечивающих оценку точности навигационной системы на основе альтернативных от навигационных спутниковых данных, является актуальной.

Обзор существующих подходов

В силу глобальности навигационных систем одним из простейших способов оценки точности их функционирования являются методы на основе навигационных спутниковых сигналов. Однако, как было сказано в разделе «Введение», использование спутниковых сигналов в городских условиях сильно затруднено, поэтому для

оценки точности навигационной системы (на уровне 1 м) могут подходить только определенные городские локации.

Еще более простым подходом к оценке точности является метод использования контрольных точек. Суть метода заключается в оценке точности системы на остановках, координаты которых заранее известны [7]. Например, на штатных остановках трамвая. Плюсы такого подхода — простота и надежность. Основными недостатками является необходимость проведения геодезических работ, временные затраты, необходимость остановки объекта именно в заданной точке (для обеспечения высокой точности определения координат), что не всегда возможно.

Для рельсового транспорта принципиально возможным является и другой метод, основанный на использовании цифровых дорожных карт. Этот подход предполагает сравнение координат навигационной системы с координатами дороги, смоделированными сплайном маршрута [8, 9]. Из плюсов можно отметить простоту, надежность и высокую степень охвата. Однако данный метод не позволяет оценить продольную составляющую ошибки, которая, к сожалению, накапливается при длительном движении трамвая по протяженным прямым участкам маршрута.

Другой вариант — использование карты высокой точности и лидарного датчика. Убедиться в высокой точности и эффективности этого метода в различных условиях можно по работам [10–12]. Однако он не лишен недостатков: высокая стоимость, подверженность неблагоприятным погодным условиям (сильный дождь или туман), а также сложность создания карт в реальном времени в быстро меняющихся городских условиях.

Другими возможными методами являются подходы, основанные на распознавании объектов на основе технического зрения. При этом координаты навигационной системы и пеленг внешних объектов по измерениям с камеры могут сравниваться с координатами обнаруженного объекта на карте [13–15]. Недостатки подхода связаны с частым заслонением ориентиров в городской сцене, сложностью распознавания некоторых типов объектов, отсутствием ориентиров в некоторых локациях, долгим циклом обучения нейронных сетей для решения задачи распознавания.

Альтернативным подходом к оценке точности может служить метод, использующий информацию цифровой карты дорог и сегментацию рельсового пути. При этом идея подхода заключается в оценке точности навигационного решения посредством сравнения проекции пути в кадре и распознанной нейронной сетью области дороги. На криволинейных участках, а также на участках стрелочных переводов данная информация позволяет оценить погрешность навигационной системы. В случае если пересечение области дороги и проекции цифровой карты в кадр максимальны, ошибка навигационной системы — минимальна. На прямых участках оценить точность навигационной системы не представляется возможным в силу не наблюдаемости продольной ошибки.

В представленной работе проводиться анализ подхода к оценке точности навигационной системы по результатам сегментации рельсовых путей только на криволинейных участках. Особое внимание уделяется возможным способам сопоставления информации, а также анализу потенциальной точности предложенного подхода для кривых различного радиуса.

Постановка задачи

Трамвай многократно перемещается по рельсовому пути, представленным сплайном в линейно-дугообразной форме. В каждый момент времени местоположение трамвая определяется вектором $\mathbf{x}_i = [x_i, y_i, \alpha_i]$, где x_i и y_i — координаты первой тележки трамвая в глобальной системе координат; α_i — угол ориентации первой секции (рис. 1) в месте установки тележки.

Навигационная система (GPS-датчик и IMU-сенсор) также установлены на первой секции и на рис. 1 не обозначена. Вектор $\mathbf{x}_i$ определяется системой навигации трамвая, на основе известных параметров ее расположения относительно первой тележки. Использование двумерной системы координат на практике является достаточным, в силу плавности изменения высотного профиля рельсового пути. В связи с этим вертикальная компонента z в глобальной системе координат принимается равным нулю ($z = 0$). Также задана функция рельсового пути (сплайн маршрута) $h(x_i, y_i)$, которая позволяет вычислить расстояние s_i от начала пути, через пару координат

$$h(x_i, y_i) = s_i. \tag{1}$$

Обратная функция $h^{-1}(s_i)$ определяет координаты для заданного расстояния s_i

$$h^{-1}(s_i) = (x_i, y_i).$$

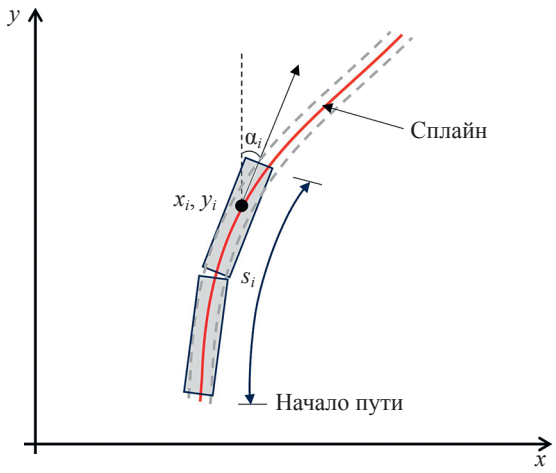


Рис. 1. Глобальная система координат и точка положения первой тележки трамвая.

Рельсовый путь (пунктирная линия); осевая линия пути — сплайн (жирная линия)

Fig. 1. Global coordinate system and the position of the tram first bogie.

Rail track (dashed line); centerline of the track as a spline (bold line)

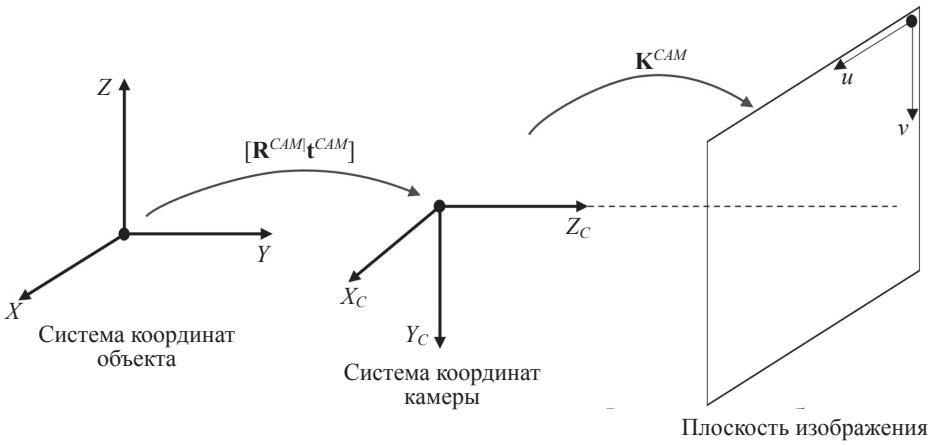


Рис. 2. Системы координат объекта и камеры, плоскость изображения и матрицы камеры

Fig. 2. Object and camera coordinate systems, image plane, and camera matrices

Камера, установленная на трамвае, в каждый момент времени i формирует изображение I_i. Внутренние параметры камеры задаются матрицей $\mathbf{K}^{CAM}$ (где *CAM* — Camera). Положение камеры в системе координат объекта устанавливается вектором смещения $\mathbf{t}^{CAM}$ и матрицей направляющих косинусов $\mathbf{R}^{CAM}$. Рис. 2 иллюстрирует системы координат объекта и камеры.

Ошибка положения трамвая в точке i задается вектором $\Delta\mathbf{x}_i = [\Delta x_i, \Delta y_i, \Delta\alpha_i]$. Истинные значения $\tilde{\mathbf{x}}_i$ определяются уравнением

$$\tilde{\mathbf{x}}_i = \mathbf{x}_i + \Delta\mathbf{x}_i.$$

Для уменьшения числа исследуемых параметров удобно использовать параметр s_i (1). Этот параметр позволяет снизить размерность задачи, тогда вектор состояния трансформируется в

$$\mathbf{x}_i = [s_i, \alpha_i],$$

а вектор ошибок $\Delta\mathbf{x}_i$ в

$$\Delta\mathbf{x}_i = [\Delta s_i, \Delta\alpha_i].$$

Для оценки вектора ошибок $\Delta\mathbf{x}_i$ используется информация сегментированного изображения рельсового пути (рис. 3) и сплайна маршрута.

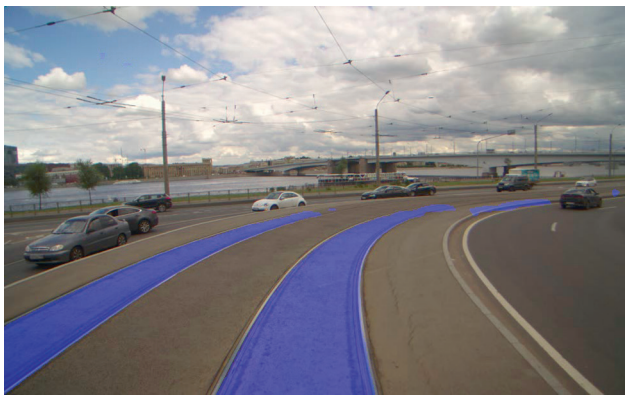


Рис. 3. Сегментационное изображение I_i

Fig. 3. Segmented image I_i

При этом возможны два подхода к оценке невязки выхода сегментационной сети и проекции сплайна на основе текущего положения трамвая $\mathbf{x}_i$. Первый предполагает решение задачи определения невязки в системе координат изображения (проекция сплайна в кадр), второй — в глобальной системе координат (проекция сегментации в систему координат объекта).

1. Нахождение соответствия между спроецированным рельсом по известной функции сплайна и его сегментации, изображенным на I_i с использованием метрики Intersection over Union (IoU или коэффициент пересечения фигур — индекс Жаккара) (рис. 4, *a*).
2. Нахождение невязки между сплайном и средней линией (скелет), полученной на основе сегментационного изображения (рис. 4, *b*).

Уравнение наблюдения представим в виде:

$$y_i = H^{1,2}(\mathbf{x}_i + \Delta\mathbf{x}_i) + \omega_i,$$

где $H^{1,2}(\mathbf{x}_i + \Delta\mathbf{x}_i)$ — функция связи вектора $\mathbf{x}_i$ с измерениями; ω_i — шум наблюдения, имеет нормальное распределение с нулевым средним и заданной дисперсией $N(0, \sigma_\omega^2)$, N — нормальное распределение.

Будем также считать, что изменение погрешностей навигационной системы в течении процедуры оценки точности описывается следующим уравнением

$$\Delta\mathbf{x}_{i+1} = \Delta\mathbf{x}_i + \mathbf{v}_i,$$

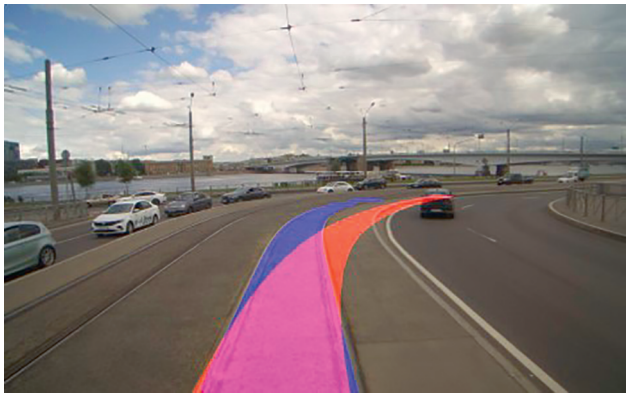
где $\mathbf{v}_i$ — шум модели состояния, имеющий нормальное распределение с нулевым средним и заданной дисперсией $\mathbf{N}(0, \sigma_v^2)$.

Требуется найти оценку вектора $\Delta\mathbf{x}_i$ и его ковариационную матрицу.

Описание алгоритма

Для перехода от координат точек первой тележки трамвая в систему координат камеры и обратно необходимо использовать следующие формулы. По координатам тележки вычисляется положение VR точки (передняя точка трамвая на середине бампера, где VR (Vehicle Related) — система координат, связанная с объектом (рис. 5, *a*)) в глобальной системе координат

a



b

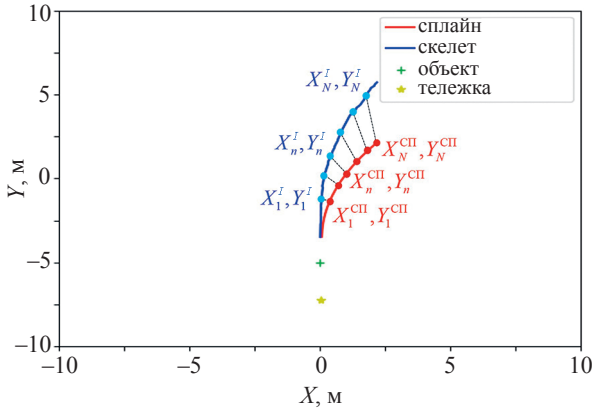


Рис. 4. Два подхода к оценке невязки: визуализация невязки по первой (IoU) (*a*) и второй (*b*) методикам.
n — номер формируемой невязки, $n = 1, \ldots, N$; СП — сплайн; $(X_n^{СП}, Y_n^{СП})$ — координаты точки сплайна *n* в системе координат объекта; *I* — Image; (X_n^I, Y_n^I) — координаты точки скелета *n* в системе координат объекта

Fig. 4. Two approaches to residual evaluation: visualization of residuals using the first (IoU) (*a*) and the second (*b*) methods.
n — the index of the calculated residual, $n = 1, \ldots, N$; СП — spline; $(X_n^{СП}, Y_n^{СП})$ — the coordinates of the *n*-th spline point in the object coordinate system; *I* — Image; (X_n^I, Y_n^I) — the coordinates of the *n*-th skeleton point in the object coordinate system

$$x_i^{VR} = x_i + A \cdot \sin(\alpha_i), \tag{2}$$

$$y_i^{VR} = y_i + A \cdot \cos(\alpha_i), \tag{3}$$

где *A* — известное расстояние от первой тележки до середины переднего бампера.

Для преобразования координат из глобальной системы координат в систему координат объекта, где $Z = 0$ (при этом *Z* обозначает вертикальную компоненту в системе координат объекта, принимаемую равной нулю из-за плавности изменения высотного профиля рельсового пути, рис. 5, *b*) применим следующую формулу для произвольной точки сплайна *n* с координатами $\mathbf{t}_n^{СП} = [x_n^{СП}, y_n^{СП}, 0]^T$:

$$\mathbf{T} = \mathbf{R}(\alpha_i)[\mathbf{t}_n^{СП} - \mathbf{t}_i^{VR}], \tag{4}$$

где $\mathbf{t}_i^{VR} = [x_i^{VR}, y_i^{VR}, 0]^T$ — положение VR центра в глобальной системе координат в момент времени *i*; $\mathbf{T} = [X_n^{СП}, Y_n^{СП}, 0]^T$ — вектор координат точки сплайна в системе координат объекта; $\mathbf{R}(\alpha_i)$ — матрица поворота на основе текущего угла ориентации трамвая α_i, используемая для преобразования координат сплайна маршрута из глобальной системы координат в систему координат трамвая.

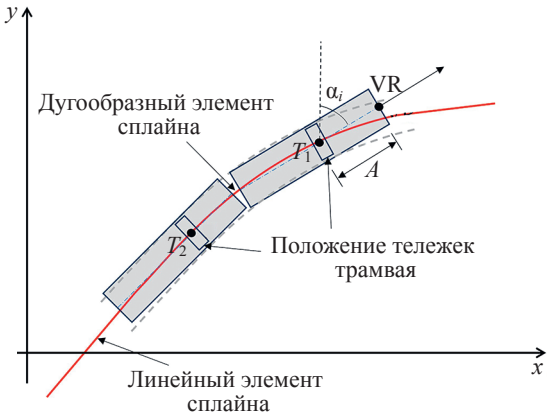
Положение сплайна в плоскости изображения определяется по формуле

$$\begin{bmatrix} u_n \\ v_n \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{K}^{CAM}[\mathbf{R}^{CAM}|\mathbf{t}^{CAM}] \begin{bmatrix} X_n^{СП} \\ Y_n^{СП} \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \tag{5}$$

где $[u_n, v_n]$ — координаты точки сплайна в плоскости изображения; $[X_n^{СП}, Y_n^{СП}, 0]$ — в системе координат объекта.

Формулы (2)–(5) характеризуют функцию $H^{1,2}(\mathbf{x}_i + \Delta\mathbf{x}_i)$ как существенно нелинейную, поэтому для ре-

a



b

Рис. 5. Схематическое изображение и системы координат двухсекционного трамвая: упрощенная схема двухсекционного трамвая для реализации кинематической модели (*a*); система координат объекта и система координат камеры (*b*)

Fig. 5. Schematic illustration and coordinate systems of a two-section tram: Simplified diagram of a two-section tram for implementing a kinematic model (*a*); Object coordinate system and camera coordinate system (*b*)

шения задачи оценивания необходимо воспользоваться аппаратом нелинейной фильтрации на основе фильтра частиц. Включение в состав $\Delta\mathbf{x}_i$ параметра пути s_i, позволяет удобно генерировать возможные местоположения трамвая на путях. Вводя некоторый случайный параметр сдвига d (вперед или назад от текущего положения первой тележки), можно сформировать множество возможных координат местоположения трамвая.

Для оценки точности позиционирования трамвая в каждый момент времени i генерируется K случайных гипотез «частиц», определяющих возможное местоположение трамвая. Для каждой гипотезы $j \in 1, \ldots, K$ выполняется проекция координат сплайна в кадр изображения (первый подход) и в систему координат объекта (второй подход). Для расчета весов частиц $\tilde{\mu}_{ij}$ используется следующая формула

$$\tilde{\mu}_{ij} = \exp\left(-\frac{1}{2} z_{ij}^T R^{-1} z_{ij}\right),$$

где R — среднее квадратическое отклонение, характеризующее точность измерений; z_{ij} — невязка между измеренными координатами и координатами j-й частицы в момент времени i.

Для первого подхода

$$z_{ij} = 1 - \mathrm{IoU}(I_i, I(s_i + d_j)),$$

где $I(s_i + d_j)$ — синтезированное изображение с проекцией сплайна пути для j-й частицы с учетом перемещения первой тележки на d_j (рис. 6, *a*).

Для второго подхода

$$z_{ij} = f(S(I_i), h^{-1}(s_i + d_j)) = \sum_{n=1}^{N} r_n^2 = \sum_{n=1}^{N} (X_n^{\text{СП}} - X_n^I)^2 + (Y_n^{\text{СП}} - Y_n^I)^2,$$

где функция f вычисляет евклидово расстояние между точками на центральной линии, полученной из скелетонизации сегментированного изображения рельсов, и точками сплайна маршрута, зависящими от текущего положения трамвая; $S(I_i)$ — функция формирования осевой линии дороги по сегментации, основанная на скелетонизации (скелет на рис. 4, *b*); n — номер формируемой невязки, $n = 1, \ldots, N$ (пунктирные линии на рис. 4, *b*); r_n — расстояние между n-й точкой первой линии (скелета) и n-й точкой второй линии (сплайна).

Нормализованные веса μ_{ij} получаются с помощью уравнения

$$\mu_{ij} = \frac{\tilde{\mu}_{ij}}{\sum_{j=1}^{K} \tilde{\mu}_{ij}}.$$

Истинное положение $\tilde{\mathbf{x}}_i$ определяется уравнением

$$\tilde{\mathbf{x}}_i = \sum_{j=1}^{K} (\mathbf{x}_i + \Delta\mathbf{x}_i^j)\mu_{ij}.$$

Для оценки точности определения ошибок Δs и $\Delta\alpha$ используется среднеквадратическое отклонение (СКО) (σ_s и σ_α) для N изображений (моментов времени), в которых проводилась оценка точности на каждом повороте.

$$\sigma_s = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N} (\Delta s_i - \overline{\Delta s})^2}, \quad (6)$$

$$\sigma_\alpha = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N} (\Delta\alpha_i - \overline{\Delta\alpha})^2}. \quad (7)$$

Оценка точности на основе статистических испытаний

Моделирование и параметры испытаний. Для проведения моделирования были выбраны несколько характерных криволинейных участков маршрута трамвая, отличающихся радиусами кривизны. Для каждого

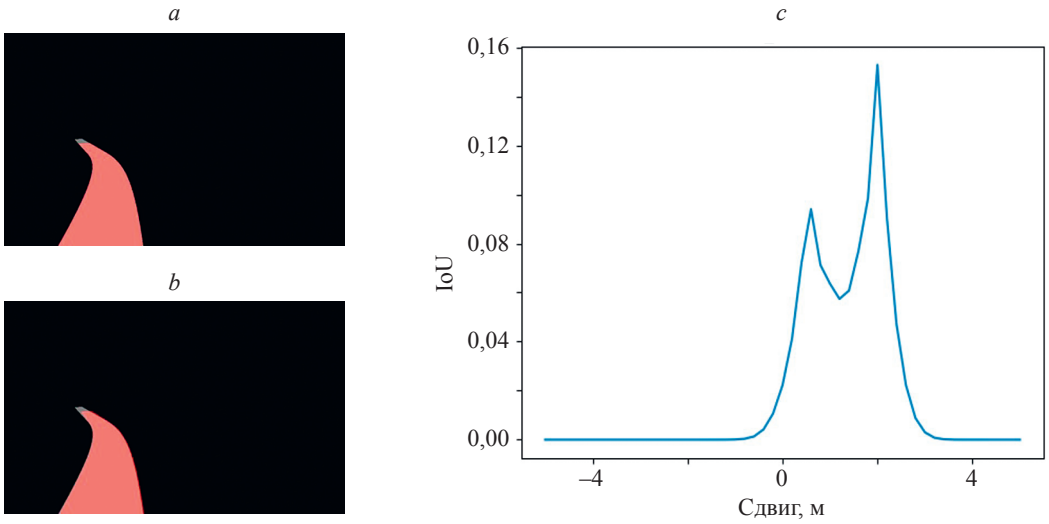


Рис. 6. Сравнение сегментации (красный цвет) и проекции (серый цвет) сплайна в начале поворота при сдвигах сплайна на 2 м (*a*) и на 0,4 м (*b*) вперед; соответствующие веса сдвигов (*c*)

Fig. 6. Comparison of segmentation (red) and spline projection (gray) at the start of a turn with spline shifts of 2 m (*a*) and 0.4 m (*b*) forward; Corresponding shift weights (*c*)

из этих участков выполнены многократные виртуальные проезды трамвая с моделированием различных значений навигационных погрешностей. Это позволило протестировать предложенный метод в условиях, приближенных к реальным, с учетом типичных ошибок позиционирования, которые могут возникнуть в городской среде. На каждом из участков были созданы искусственные сдвиги положения трамвая на основе заранее заданных значений погрешностей, таких как смещения вперед и назад на несколько метров от исходного положения. Таким образом, можно было оценить, насколько метод стабилен и точен при различных ошибках позиционирования, и визуализировать его работу в различных условиях.

Для проведения эксперимента были выбраны изображения, сделанные на выходе из поворота. Это решение связано с тем, что в начале поворота почти одинаковая геометрия сплайна может появляться дважды на разных этапах движения трамвая. Иначе говоря, в начале поворота, на небольших интервалах, сплайн принимает схожие формы, что затрудняет точную идентификацию ошибок. Пример этого можно увидеть на рис. 6, где наблюдаются два пика, указывающие на возможные совпадения. В центральной части поворота изменения в изображении минимальны, что снижает эффективность анализа. По этой причине, использование изображений на выходе из поворота дает более надежные результаты, обеспечивая высокую точность при оценке ошибок.

В эксперименте использованы навигационные сдвиги первой тележки, которые смоделированы случайным образом из нормального распределения с математическим ожиданием 0 и стандартным отклонением 5 м. Для каждого радиуса кривой и величины введенной ошибки был рассчитан показатель СКО (σ_s). На рис. 7 представлены результаты для методов IoU и невязок, демонстрирующие их средние значения СКО для различных радиусов. На рисунке видно, что СКО увеличивается с ростом радиуса кривизны для обоих методов, что указывает на сложность точного позиционирования на более пологих поворотах. Это объясняется тем, что при увеличении радиуса повороты становятся более похожими на прямые участки, что снижает различимость ключевых признаков, используемых для вычислений СКО. Метод IoU демонстрирует значительно меньшие значения СКО по сравнению с методом невязок на всем диапазоне радиусов, что свидетельствует о его большей точности и устойчивости. Особенно заметно преимущество IoU на малых радиусах (до 300 м), где его СКО остается ниже 0,05 м, в то время как для метода невязок наблюдаются резкие колебания и пики до 0,1 м и выше, что объясняется ошибками метода скелетонизации, используемом для определения средней линии области дороги. Кроме того, при радиусах менее 600 м оба метода обеспечивают точность менее 1 м, что является важным показателем для практического применения. Однако метод IoU остается более стабильным даже при увеличении радиуса, в то время как метод невязок демонстрирует значительные отклонения, особенно на радиусах свыше 400 м.

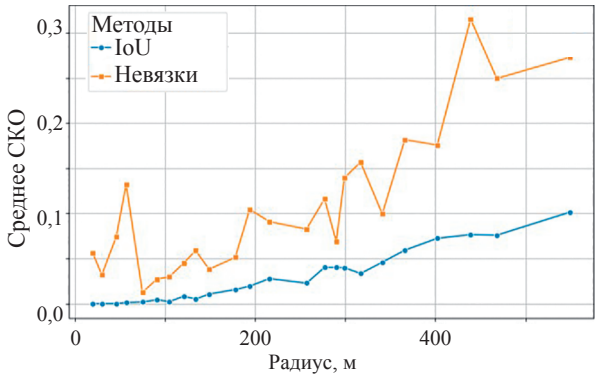


Рис. 7. Среднее среднеквадратическое отклонение методов IoU и невязок для разных значений радиусов

Fig. 7. Mean standard deviation of IoU and the residual methods for different radius values

Ввиду явного преимущества метода IoU в точности и стабильности, данный метод был выбран для использования в реальных экспериментах.

Практическое применение и реальные испытания. Для подтверждения результатов моделирования были использованы реальные данные, собранные на трамвайных маршрутах в городской среде (маршрут № 24 в городе Санкт-Петербурге) (рис. 8, *a*). Во время этих испытаний проводилась сегментация рельсов в реальных условиях, и на основе полученных данных оценивались ошибки навигационной системы (рис. 8, *b*, *c*).

В таблице представлены результаты анализа, основанные на реальных данных, полученных во время испытаний навигационной системы на трамвайном маршруте. Для каждого радиуса кривизны были рассчитаны значения σ_s и σ_α по формулам (6) и (7).

Анализ ошибок на поворотах играет ключевую роль в понимании того, насколько точно навигационная система определяет свое местоположение. На таких участках часто возникают расхождения между фактическим положением трамвая и его расчетным местоположением. Результаты оценки точности показали, что оценка ошибок на криволинейных участках помогает выявить недостатки в работе навигационной системы и предоставляет ценные данные для анализа ее точности.

Таблица. Результаты оценки точности навигационной системы трамвая на поворотах с различными радиусами маршрута

Table. Results of evaluating the navigation system accuracy of the tram on turns with various radii

Радиус, м	σ_s, м	σ_α
19,4	0,284	8°46′37″
31,3	0,431	0°43′19″
53,8	0,201	0°11′46″
60,6	0,390	0°11′49″
114,8	0,461	0°5′17″
355,3	0,691	0°2′49″
812,0	0,856	0°1′52″

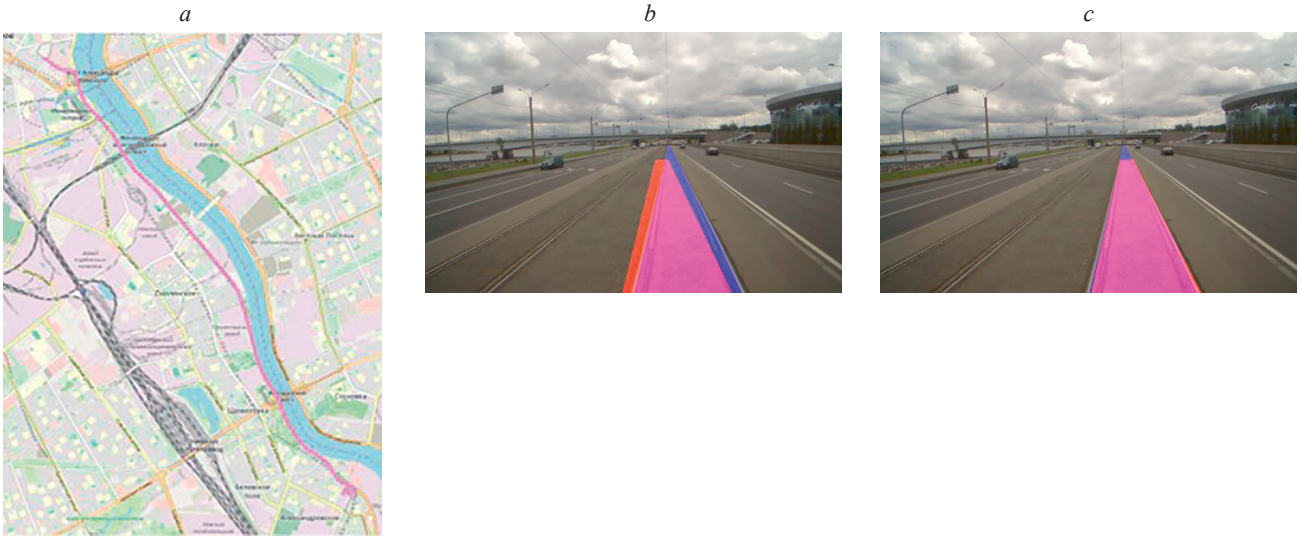


Рис. 8. Реальные испытания: маршрут трамвая на карте (розовый цвет) (*a*); проекция сплайна (красный цвет) на основе полученных данных, синий цвет — сегментация (*b*); проекция сплайна после оценки ошибки навигационной системы (*c*)

Fig. 8. Real-world tests: Tram route on the map (pink) (*a*); Spline projection (red) based on collected data, blue — segmentation (*b*); Spline projection after evaluating navigation system error (*c*)

Качество работы нейронной сети и предложенного подхода в целом зависит от качества входных данных, которое может варьироваться в реальных условиях эксплуатации. Это делает актуальным оценку метода при изменении погодных условий или качества дорожного покрытия. Группа ошибок, связанных с погодными условиями, проявляется прежде всего в виде появления объектов — типа «дворники» в кадре и общем размытии изображения в силу многочисленных капель на стекле. Ее решение прежде всего основывается на использовании последовательности кадров, позволяющих нивелировать отдельные «плохие» изображения. Реализация алгоритмов накапливания сегментации на последовательности кадров может решаться как с использованием более продвинутых – архитектур типа «трансформер» или инженерными методами, например, на основе вероятностных карт и метода Байеса. Вторая группа ошибок, связанная с «новым» типом дорожного покрытия, решается за счет дообучения нейронной сети.

Используемая в работе сегментационная нейронная сеть показала высокую устойчивость в различных сценариях: в дневное и ночное время, заснеженные дороги и слякоть. При использовании стендов, содержащих существенно плохие погодные условия, используется метод построения вероятностных карт.

Очевидно, что эффективность данного подхода оценки точности зависит от геометрии пути, на прямых участках его эффективность равна нулю. Развитием данного подхода может являться использование на пути следования стрелочных переводов, которые аналогично кривым сравниваются с картой путей и позволяют оценить продольную составляющую ошибки в окрестности их расположения.

Заключение

В работе представлен подход к оценке точности навигационных систем на основе информации систем технического зрения и данных цифровой карты в виде сплайна. Предложенные методы, основанные на сравнении сегментированных изображений и проекций пути, позволяют эффективно оценивать точность позиционирования трамваев на криволинейных участках маршрута. Проведенные эксперименты показали, что использование метода (Intersection over Union) на основе сегментации, значительно улучшает оценку точности навигационной системы, особенно на участках с малым радиусом кривизны. Результаты экспериментов подтверждают, что предложенный подход может служить не только эффективным средством оценки точности навигационных систем, не прибегая к какой-либо внешней информации, например, GPS, но и обеспечивать коррекцию показаний навигационной системы в условиях ее подавления, что способствует счислению координат в условиях спуфинга спутникового сигнала.

Литература

1. Lobanov M.G., Sholomov D.L. Application of shared backbone DNNs in ADAS perception systems // Proceedings of SPIE. 2021. V. 11605. P. 1160525. https://doi.org/10.1117/12.2586932
2. Guzhva N.S., Prun V.E., Postnikov V.V., Lobanov M.G., Sadekov R.N., Sholomov D.L. Using 3D object detection DNN in an autonomous tram to predict the behaviour of vehicles in the road scene // Proc. of the 29th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation

References

1. Lobanov M.G., Sholomov D.L. Application of shared backbone DNNs in ADAS perception systems. *Proceedings of SPIE*, 2021, vol. 11605, pp. 1160525. https://doi.org/10.1117/12.2586932
2. Guzhva N.S., Prun V.E., Postnikov V.V., Lobanov M.G., Sadekov R.N., Sholomov D.L. Using 3D object detection DNN in an autonomous tram to predict the behaviour of vehicles in the road scene. *Proc. of the 29th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation*

Systems (ICINS). 2022. P. 1–6. https://doi.org/10.23919/ICINS51784.2022.9815388
3. Dikeman M., Burns C. Trust in autonomous vehicles: The case of Tesla Autopilot and Summon // IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC). 2017. P. 1093–1098. https://doi.org/10.1109/smc.2017.8122757
4. Kukkala V.K., Tunnell J., Pasricha S., Bradley T. Advanced Driver-Assistance Systems: a path toward autonomous vehicles // IEEE Consumer Electronics Magazine. 2018. V. 7. N 5. P. 18–25. https://doi.org/10.1109/mce.2018.2828440
5. Song J.H., Jee G.I. Performance enhancement of land vehicle positioning using multiple GPS receivers in an urban area // Sensors. 2016. V. 16. N 10. P. 1688. https://doi.org/10.3390/s16101688
6. Jimenez F., Monzon S., Naranjo J.E. Definition of an enhanced map-matching algorithm for urban environments with poor GNSS signal quality // Sensors. 2016. V. 16. N 2. P. 193. https://doi.org/10.3390/s16020193
7. Шолохов А.В., Беркович С.Б., Котов Н.И., Садеков Р.Н. Формирование траектории корреляционно-экстремальной навигационной системы по критерию минимума погрешностей координат // Юбилейная XXV Санкт-Петербургская Международная конференция по интегрированным навигационным системам: Сборник материалов. СПб.: “Концерн “Центральный научно-исследовательский институт “Электроприбор”, 2018. С. 175–177.
8. Salleh D.N.S.D.A., Seignez E. Longitudinal error improvement by visual odometry trajectory trail and road segment matching // IET Intelligent Transport Systems. 2019. V. 13. N 2. P. 313–322. https://doi.org/10.1049/iet-its.2018.5272
9. Alonso I.P., Llorca D.F., Gavilan M., Pardo S.A., García-Garrido M.A., Vlacic L., Sotelo M.A. Accurate global localization using visual odometry and digital maps on urban environments // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. 2012. V. 13. N 4. P. 1535–1545. https://doi.org/10.1109/TITS.2012.2193569
10. Schaefer A., Büscher D., Vertens J., Luft L., Burgard W. Long-term urban vehicle localization using pole landmarks extracted from 3-D lidar scans // Proc. of the European Conference on Mobile Robots (ECMR). 2019. P. 1–7. https://doi.org/10.1109/ecmr.2019.8870928
11. Бикмаев Р.Р., Полукаров А.А., Садеков Р.Н. Определение местоположения наземного транспортного средства с использованием монокамеры и дорожных знаков с геодезической привязкой // XXVII Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам: Сборник материалов. СПб.: «Концерн «Центральный научно-исследовательский институт «Электроприбор», 2020. С. 341–345.
12. Wang L., Zhang Y., Wang J. Map-based localization method for autonomous vehicles using 3D-LIDAR // IFAC-PapersOnline. 2017. V. 50. N 1. P. 276–281. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.046
13. Wang C., Huang H., Ji Y., Wang B., Yang M. Vehicle localization at an Intersection using a traffic light map // IEEE Transactions on intelligent transportation systems. 2019. V. 20. N 4. P. 1432–1441. https://doi.org/10.1109/TITS.2018.2851788
14. Murali V., Chiu H.P., Samarasekera S., Kumar R.T. Utilizing semantic visual landmarks for precise vehicle navigation // Proc. of the IEEE 20th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). 2017. P. 1–8. https://doi.org/10.1109/ITSC.2017.8317859
15. Qu X., Soheilian B., Paparoditis N. Landmark based localization in urban environment // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2018. V. 140. P. 90–103. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.09.010

Systems (ICINS), 2022, pp. 1–6. https://doi.org/10.23919/ICINS51784.2022.9815388
3. Dikeman M., Burns C. Trust in autonomous vehicles: The case of Tesla Autopilot and Summon. *IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*, 2017, pp. 1093–1098. https://doi.org/10.1109/smc.2017.8122757
4. Kukkala V.K., Tunnell J., Pasricha S., Bradley T. Advanced Driver-Assistance Systems: a path toward autonomous vehicles. *IEEE Consumer Electronics Magazine*, 2018, vol. 7, no. 5, pp. 18–25. https://doi.org/10.1109/mce.2018.2828440
5. Song J.H., Jee G.I. Performance enhancement of land vehicle positioning using multiple GPS receivers in an urban area. *Sensors*, 2016, vol. 16, no. 10, pp. 1688. https://doi.org/10.3390/s16101688
6. Jimenez F., Monzon S., Naranjo J.E. Definition of an enhanced map-matching algorithm for urban environments with poor GNSS signal quality. *Sensors*, 2016, vol. 16, no. 2, pp. 193. https://doi.org/10.3390/s16020193
7. Sholokhov A.V., Berkovich S.B., Kotov N.I., Sadekov R.N. Formation of the trajectory of the correlation-extreme navigation system according to the criterion of minimum coordinate errors. *Proc. of the 25th St. Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems*, 2018, pp. 175–177. (in Russian)
8. Salleh D.N.S.D.A., Seignez E. Longitudinal error improvement by visual odometry trajectory trail and road segment matching. *IET Intelligent Transport Systems*, 2019, vol. 13, no. 2, pp. 313–322. https://doi.org/10.1049/iet-its.2018.5272
9. Alonso I.P., Llorca D.F., Gavilan M., Pardo S.A., García-Garrido M.A., Vlacic L., Sotelo M.A. Accurate global localization using visual odometry and digital maps on urban environments. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2012, vol. 13, no. 4, pp. 1535–1545. https://doi.org/10.1109/TITS.2012.2193569
10. Schaefer A., Büscher D., Vertens J., Luft L., Burgard W. Long-term urban vehicle localization using pole landmarks extracted from 3-D lidar scans. *Proc. of the European Conference on Mobile Robots (ECMR)*. 2019, pp. 1–7. https://doi.org/10.1109/ecmr.2019.8870928
11. Bikmaev R.R., Polukarov A.A., Sadekov R.N. Position location of a land vehicle using a single-camera and road signs with geodetic coupling. *Proc. of the 27th St. Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems*, 2020, pp. 341–345. (in Russian)
12. Wang L., Zhang Y., Wang J. Map-based localization method for autonomous vehicles using 3D-LIDAR. *IFAC-PapersOnline*, 2017, vol. 50, no. 1, pp. 276–281. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.046
13. Wang C., Huang H., Ji Y., Wang B., Yang M. Vehicle localization at an Intersection using a traffic light map. *IEEE Transactions on intelligent transportation systems*, 2019, vol. 20, no. 4, pp. 1432–1441. https://doi.org/10.1109/TITS.2018.2851788
14. Murali V., Chiu H.P., Samarasekera S., Kumar R.T. Utilizing semantic visual landmarks for precise vehicle navigation. *Proc. of the IEEE 20th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, 2017, pp. 1–8. https://doi.org/10.1109/ITSC.2017.8317859
15. Qu X., Soheilian B., Paparoditis N. Landmark based localization in urban environment. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2018, vol. 140, pp. 90–103. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.09.010

Авторы

Али Бушра — аспирант, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Москва, 119049, Российская Федерация, SC 58221235200, https://orcid.org/0000-0001-6895-1505, bushrayehyaali@gmail.com

Садеков Ринат Наилевич — доктор технических наук, доцент, главный инженер-разработчик, АО «Когнитив», Москва, 634063, Российская Федерация; профессор, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Москва, 119049, Российская Федерация, SC 56040068200, https://orcid.org/0000-0001-6286-358X, r.sadekov@misis.ru

Authors

Bushra Ali — PhD Student, University of Science and Technology MISIS, Moscow, 119049, Russian Federation, SC 58221235200, https://orcid.org/0000-0001-6895-1505, bushrayehyaali@gmail.com

Rinat N. Sadekov — D.Sc., Associate Professor, Chief Engineer-Developer, Cognitive JSC, Moscow, 634063, Russian Federation; Professor, University of Science and Technology MISIS, Moscow, 119049, Russian Federation, SC 56040068200, https://orcid.org/0000-0001-6286-358X, r.sadekov@misis.ru

Статья поступила в редакцию 08.11.2024
Одобрена после рецензирования 26.06.2025
Принята к печати 23.07.2025

Received 08.11.2024
Approved after reviewing 26.06.2025
Accepted 23.07.2025

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ
июль–август 2025 Том 25 № 4 http://ntv.ifmo.ru/
SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL OF INFORMATION TECHNOLOGIES, MECHANICS AND OPTICS
Jule–August 2025 Vol. 25 No 4 http://ntv.ifmo.ru/en/
ISSN 2226-1494 (print) ISSN 2500-0373 (online)

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ

doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-4-780-788
УДК 004.021

Построение оптимального плана дозаправок с использованием агрегированных сведений о значениях параметров маршрута из открытых источников

Максим Сергеевич Есин[1]✉, Максим Викторович Абрамов[2]

[1,2] Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук, Санкт-Петербург, 199178, Российская Федерация

[1] mse@dscs.pro✉, https://orcid.org/0000-0003-1011-9788
[2] mva@dscs.pro, https://orcid.org/0000-0002-5476-3025

Аннотация

Введение. Представлены результаты исследования подходов к решению задачи комбинаторной условной оптимизации плана дозаправок вдоль фиксированного автомобильного маршрута с учетом ограничений на объем бака, начального и конечного объема топлива, а также постоянного расхода топлива. Методы решения подобных задач основаны на применении алгоритмов поиска кратчайших путей, а также на методах линейного программирования. Их недостатком является недостаточная детализация состояний, получение нецелочисленных решений и высокая вычислительная сложность. Новизна представленного решения заключается в использовании расширенного пространства состояний и в разработке точного алгоритма, гарантирующего целочисленность планов и более низкую асимптотическую сложность. **Метод.** Предложенный алгоритм основан на применении двумерного динамического программирования, при котором для каждого узла маршрута и остатка топлива пересчитывается минимальная стоимость достижения состояния путем выбора между переходом без дозаправки и переходом с дозаправкой на одно деление бака. Алгоритм позволяет решать задачу оптимально за полиномиальное время при квадратичной сложности относительно числа узлов маршрута. **Основные результаты.** Апробация метода проводилась путем сравнения предложенного алгоритма с альтернативными подходами, основанными на графовых представлениях маршрута и методах линейного программирования. Для каждого подхода были построены алгоритмы решения поставленной задачи, после чего проведен сравнительный анализ их асимптотической сложности, а также точности и целочисленности получаемых решений. Предложенный алгоритм, в отличие от альтернативных вариантов, обеспечивает одновременно целочисленность компонент оптимального решения и имеет более низкую асимптотическую сложность. **Обсуждение.** Разработанные алгоритмы применимы для снижения затрат на топливо при транспортировке грузов, а также для повышения экономической эффективности туристических поездок по России. Дальнейшее направление исследования связано с учетом дополнительных факторов, влияющих на расход топлива, что потребует перехода к задачам большей размерности и разработке эвристических методов для их эффективного решения.

Ключевые слова

оценка стоимости поездки, динамическое программирование, комбинаторная оптимизация, алгоритм пересчета динамики, асимптотическая оценка сложности

Благодарности

Работа выполнена в рамках проекта по государственному заданию СПб ФИЦ РАН № FFZF-2025-0006.

Ссылка для цитирования: Есин М.С., Абрамов М.В. Построение оптимального плана дозаправок с использованием агрегированных сведений о значениях параметров маршрута из открытых источников // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2025. Т. 25, № 4. С. 780–788. doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-4-780-788

© Есин М.С., Абрамов М.В., 2025

Building an optimal refueling plan using aggregated information about route parameter values from open sources

Maxim S. Esin[1]✉, Maxim V. Abramov[2]

[1,2] St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS), Saint Petersburg, 199178, Russian Federation

[1] mse@dscs.pro✉, https://orcid.org/0000-0003-1011-9788
[2] mva@dscs.pro, https://orcid.org/0000-0002-5476-3025

Abstract

The paper presents the results of a study of approaches to solving the problem of combinatorial conditional optimization of the refueling plan along a fixed automobile route, taking into account restrictions on tank volume, initial and final fuel volumes as well as constant fuel consumption. Methods for solving such problems are based on the use of algorithms for finding the shortest paths as well as linear programming methods. Their disadvantage is the lack of granularity of states, obtaining non-integer solutions, and high computational complexity. The novelty of the solution lies in the use of an expanded state space and the development of an accurate algorithm that guarantees a high number of plans and a lower asymptotic complexity. The proposed algorithm is based on the application of two-dimensional dynamic programming in which for each node of the route and the remaining fuel, the minimum cost of reaching the state is recalculated by choosing between a transition without refueling and a transition with refueling by one tank division. The algorithm allows solving the problem optimally in polynomial time with quadratic complexity relative to the number of nodes on the route. The method was tested by comparing the proposed algorithm with alternative approaches based on graph representations of the route and linear programming methods. Algorithms for solving the problem were constructed for each approach after which a comparative analysis of their asymptotic complexity, as well as the accuracy and integers of the solutions obtained, was carried out. The proposed algorithm simultaneously ensures the integers of the components of the optimal solution and has a lower asymptotic complexity, unlike the alternative ones. The developed algorithms are applicable to reduce fuel costs during cargo transportation as well as to increase the economic efficiency of tourist trips in Russia. The further direction of the study is related to considering additional factors affecting fuel consumption which will require a transition to higher-dimensional tasks and the development of heuristic methods for their effective solution.

Keywords

calculation of trip cost, dynamic programming, combinatorial optimization, algorithm for recalculation of dynamics by layers, asymptotic complexity analysis

Acknowledgements

The work was carried out within the framework of the project under the State Assignment of SPC RAS No. FFZF-2025-0006.

For citation: Esin M.S., Abramov M.V. Building an optimal refueling plan using aggregated information about route parameter values from open sources. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2025, vol. 25, no. 4, pp. 780–788 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-4-780-788

Введение

Минимизация расходов на топливо при следовании по заранее заданному автомобильному маршруту является одной из актуальных задач цифровизации в области автомобильной логистики и автотуризма как одного из наиболее перспективных видов развития туристической сферы в России[1]. Стоимость поездки на автомобиле во многом складывается из пройденного пути и стоимости на топливо. По результатам опроса одного автомобильного портала при следовании по маршруту 85 % опрошенных склонны останавливаться, когда топлива остается меньше трети от полного бака, а 29 % вовсе останавливаются только тогда, когда загорается индикатор пустого бака[2]. Такой подход позволяет получать локально оптимальные решения на отдельных участках пути, однако их комбинация не всегда приводит к глобально оптимальному решению.

При наличии агрегированных сведений о стоимости топлива на заправочных станциях, а также сведений о местоположении самих станций вдоль маршрута, становится возможным автоматическое построение плана дозаправок, минимизирующего общую стоимость топлива при соблюдении технических ограничений автомобиля, таких как объем бака и начальный и конечный объемы топлива. Подобная идея изложена в работе [1], в которой упоминается, что в Европе до 78 % грузовых перевозок осуществляется автомобильным транспортом, при этом снижение расходов на топливо может достигаться за счет выбора более дешевых заправочных станций. Для повышения доступности решения широкому кругу пользователей дополнительно рассматривается задача создания онлайн-сервиса, который позволит в реальном времени рассчитывать оптимальные планы дозаправок на основе актуальных данных о заправках.

Теоретически задача минимизации расходов топлива сводится к решению проблемы условной дискретной оптимизации: требуется определить, в каких станциях вдоль маршрута и на сколько надо заправиться, чтобы, пройдя весь путь от начальной до конечной точек, потратить на топливо минимально возможную сумму. При

[1] Автомобильный туризм в России является наиболее перспективным видом развития туристической сферы [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://ac.gov.ru/news/page/avtomobilnyj-turizm-v-rossii-avlaetsa-naiboleeperspektivnym-vidom-razvitia-turisticeskoj-sfery-27813 (дата обращения: 17.07.2025).

[2] Опрос: где, как и чем заправляетесь? [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://auto.ru/mag/article/pollaboutfuelstations/ (дата обращения: 17.07.2025).

этом необходимо учитывать ограничения на максимальный объем бака и невозможность движения с пустым баком между узлами маршрута. Рассматриваемая в настоящей работе задача не гарантирует минимизацию расходов на преодоление пути между двумя точками, поскольку рассматривает только один фиксированный маршрут между ними, а не все возможные маршруты.

Однако данных о заправочных станциях и топливе может быть недостаточно для построения точной модели. Данные о загруженности и уклоне дорог, стиле вождения (который влияет на расход топлива), а также характеристики автомобиля и степень актуальности полученных цен на топливо и данных о погодных условиях могут влиять на оптимальность построенного плана дозаправок [2, 3]. Решение проблемы нехватки данных заключается в использовании открытых источников в реальном времени и расширении набора пользовательских параметров. Повышение размерности задачи и учет стохастических факторов в дальнейшем потребуют применения эвристик и обучения моделей на основе поэтапного добавления признаков. Поэтому в рамках данного исследования акцент сделан на разработке точных алгоритмов для задачи низкой размерности, необходимых для последующего построения сложных моделей.

В работе предложен точный полиномиальный алгоритм построения оптимального плана дозаправок, основанный на методах двумерного динамического программирования. Алгоритм реализует пошаговый пересчет таблицы состояний, в которой каждое новое состояние определяется минимизацией между переходом без дозаправки и заправкой на одно деление бака. Показано, что предлагаемый алгоритм строит решение уравнения Беллмана для рассматриваемой задачи, что гарантирует глобальную оптимальность найденного плана. Асимптотическая оценка предложенного алгоритма по времени — $O(N^2)$, где N — число узлов маршрута.

Существующие подходы к решению, рассматриваемые в обзоре релевантных работ, имеют ряд недостатков в контексте рассматриваемой задачи и работы онлайн-сервиса. Точные графовые методы, основанные на поиске кратчайших путей в сетевой структуре состояний, имеют сложность $O(N^2\log_2 N)$ в разреженном и $O(N^4)$ в плотном случае. Подходы на основе линейного программирования имеют сложность не ниже $O(N^3)$ на одну итерацию симплекс-метода. Более того, предложенный подход также обеспечивает целочисленность построенного плана дозаправок без необходимости последующего округления или модификации результата, в отличие от методов линейного программирования, которые формируют оптимальные планы с нецелочисленными значениями объема.

Практическая значимость работы заключается в том, что полученные результаты будут использованы при расширении функциональности логистического портала Cargotime.ru[1] путем создания сервиса по построению выгодного плана дозаправок вдоль дорожного маршрута.

[1] Логистический портал Cargotime [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://cargotime.ru/ (дата обращения: 17.07.2025).

Формализация задачи

Предположим, что при построении оптимального по стоимости плана известен фиксированный маршрут от начальной до конечной точек. Маршрут представлен в виде упорядоченного конечного множества из N равноотстоящих узлов. Расстояние между соседними узлами не превышает расстояния, которое может проехать автомобиль на полном баке. Поскольку работа алгоритма не зависит от стратегии построения маршрута, оптимальность общих расходов на преодоление пути от начальной до конечной точек не гарантируется. Алгоритм оптимизирует расходы на топливо только в рамках одного фиксированного маршрута.

В рамках поставленной задачи каждой заправочной станции сопоставляется единственный ближайший узел маршрута, находящийся в некоторой фиксированной ε-окрестности станции. Для каждого узла известна цена самого дешевого топлива подходящей пользователю марки за литр на сопоставленных узлу заправочных станциях. Не исключено наличие узлов, для которых не будет сопоставлено ни одной станции. Для таких узлов цена топлива полагается равной заведомо большому числу *inf*. Если алгоритм в качестве ответа возвращает число, превышающее *inf* или равное ему, то будем считать, что построение допустимого плана дозаправок по входным данным невозможно.

Помимо данных о маршруте, известны объем бака автомобиля $V_{\max}$, начальный объем топлива V_S, конечный объем топлива V_F, а также фиксированный расход топлива v на преодоление расстояния между двумя соседними узлами. Для упрощения постановки задачи примем, что v литров равно одному делению бака, при этом v делит $V_{\max}$, V_S и V_F нацело. В дальнейшем описании постановки задачи и работы алгоритма обозначение v использоваться не будет. Вместо этого будем говорить, что $V_{\max}$, V_S и V_F равны некоторому положительному целому числу делений, а $\mathbf{C}[i]$ (где $\mathbf{C}$ — N-мерный вектор) равно минимальной стоимости заправки одного деления подходящим топливом на сопоставленных i-ому узлу заправках.

Планом задачи будем называть N-мерный вектор $\mathbf{F}$, где $\mathbf{F}[i]$ обозначает число делений, заправленных в i-ом узле. Тогда задача оптимизации сводится к минимизации значения линейной комбинации:

$$\sum_{i=0}^{N-1} \mathbf{F}[i] \times \mathbf{C}[i] \to \min.$$

При этом на вектор $\mathbf{F}$ накладываются несколько существенных ограничений.

Первая группа ограничений (неравенств), отвечает за возможное число заправленных в каждом узле делений. Бак вмещает ограниченное число делений, не большее $V_{\max}$ и не меньшее нуля. Правое неравенство является строгим из-за отсутствия возможности доехать до любой заправки на пустом баке.

Вторая и третья группы ограничений, исключают ситуации, когда автомобиль либо едет с пустым баком,

потратив в пути больше, чем суммарно заправив, либо когда едет с переполненным баком, суммарно заправив больше возможного объема бака даже с учетом потраченного в пути топлива.

Последнее равенство отвечает за то, что в конце маршрута число делений было равно требуемому, т. е. контролирует баланс имеющегося в начале, заправленного в пути и потраченного в пути топлива.

$$\begin{cases} 0 \le \mathbf{F}[i] < V_{\max} \text{ для } 0 \le i < N \\ V_S + \sum\limits_{i=0}^{n} \mathbf{F}[i] \ge n + 1 \text{ для } 0 \le n < N - 1 \\ V_S + \sum\limits_{i=0}^{n} \mathbf{F}[i] - n \le V_{\max} \text{ для } 0 \le n < N \\ V_S + \sum\limits_{i=0}^{N-1} \mathbf{F}[i] - N - 1 = V_F \end{cases}.$$

Как видно из постановки задачи, расход топлива при заезде на заправочную станцию не учитывается, поскольку сопоставленный узел находится в специально выбранной малой ε-окрестности станции.

Для приведенной постановки задачи построения оптимального плана дозаправок будет проведен анализ различных подходов к решению, а также предложен точный полиномиальный алгоритм, основанный на методах динамического программирования.

Обзор релевантных работ

В работе [4] сделан акцент на критику применения точных методов как альтернативы эвристическим методам для решения задач оптимизации маршрутов. Авторы заявили о нерелевантности применения точных методов для решения задач дистрибуции при высокой размерности или стохастической постановке задачи. В [5] приведено описание эвристического алгоритма для задачи маршрутизации и планирования с временными окнами, являющейся модификацией классической задачи о коммивояжере, оптимизационная постановка которой является NP-трудной. В перспективе развития онлайн-сервиса использование эвристических алгоритмов для решения задачи с учетом ряда стохастических факторов и степени доверия к данным очень вероятно. Однако в контексте решения текущей задачи оптимизации и создания синтетических данных для дальнейшего обучения моделей более высоких размерностей важную роль играют именно точные методы, обеспечивающие оптимальность результатов на имеющихся данных, поэтому они будут рассматриваться как основные.

Если принимать во внимание только точные методы решения, то задачу оптимизации плана дозаправок можно рассматривать как проблему линейного программирования, которая подразумевает полиномиальное по времени решение рандомизированным симплекс-методом [6, 7]. Однако, как в рамках работы разрабатываемого сервиса по оценке стоимости пути, так и сбора синтетических данных может потребоваться получить решения сразу для нескольких похожих входных данных, отличающихся объемом оставшегося топлива в баке в конце пути. При использовании методов линейного программирования потребуется пересчитывать решение нескольких «близких» задач, отличающихся только конечным объемом топлива, чего требуется избежать как минимум для эффективного сбора данных для последующего обучения новых моделей, как максимум — для текущей оперативной работы сервиса. Кроме того, решения, полученные с помощью методов линейного программирования, необязательно будут целочисленными. Требование целочисленности компонент вектора **F**, который является планом задачи, позволит снизить шум в обучающих данных, а также повысить скорость обучения, снизив число операций, связанных с округлением или дробными значениями при вычислении, например, значения функции потерь.

Задачу оптимизации плана дозаправок возможно свести к рассмотрению взвешенного ориентированного графа, где весом ребра между двумя вершинами (узлами маршрута) является некоторая величина, зависящая от расстояния между узлами и стоимостью топлива на одном из концов пути [8]. Наличие ребра между двумя вершинами сигнализирует о том, что на преодоление расстояния между ними хватит не более чем одного полного бака. Так, в работе [8] приводится описание трехмерной оптимизации алгоритма Дейкстры, которая позволяет генерировать глобально оптимальный маршрут судна. При этом в оптимизацию заложена возможность настраивать расход топлива и реагировать на погодные условия. В [9] алгоритм Дейкстры используется для вычисления средней скорости потока для минимизации расходов на топливо. В [10] использован алгоритм Форда–Беллмана для графов с отрицательными весами ребер для энергоэффективной маршрутизации электромобилей с отрицательными затратами на торможение за счет применения рекуперативной системы торможения. В [11] для оптимизации маршрута при управлении интеллектуальной системой управления отходами используется алгоритм Дейкстры. Главным недостатком графовых методов в контексте рассмотренной задачи является простота структуры графа. Так, в работе [12] в качестве алгоритма оптимизации плана дозаправок планировалось использовать алгоритм Дейкстры, для которого весом направленного ребра между двумя узлами служила стоимость заправки до полного бака в конечном узле. В оптимальном решении, которое в контексте графовых методов будет являться простой цепью вершин, остаток топлива в посещенных вершинах может быть разным. Однако в вершинах графа заложена лишь информация о стоимости топлива, а уровень топлива всегда подразумевается одинаковым (равным начальному уровню топлива) для всех вершин. Таким образом, данный подход в общем случае не гарантирует оптимальности решения, поскольку не позволяет моделировать более сложные варианты дозаправок с помощью графов.

Методы динамического программирования тоже находят применение в задачах оптимизации маршрутов. В работе [13] метод динамического программирования используется для построения оптимального маршрута электромобилей, доставляющих электроэнергию до отдаленных регионов. В [14] использованы схожие методы для задачи оптимизации маршрута морского судна с учетом различных погодных факторов. Методы

многомерной динамики позволяют решить проблему излишней простоты графовой структуры: для каждого узла маршрута можно рассматривать несколько состояний, отвечающих за разные объемы топлива, оставшиеся после перехода из предыдущего узла. Это позволит рассмотреть все возможные планы дозаправок с учетом разного объема топлива в промежуточных узлах и найти оптимальное решение в общем случае. Кроме того, применение методов динамического программирования выглядит предпочтительнее решения задачи линейного программирования, поскольку при сохранении и переиспользовании результатов промежуточных состояний (подзадач) можно получить оптимальные планы сразу для нескольких «близких» задач, что важно в контексте быстродействия разрабатываемого сервиса. Не менее важным преимуществом методов динамического программирования в контексте дальнейшей работы по обучению моделей является целочисленность компонентов оптимального плана задачи (в случае, если множество допустимых планов не пусто), которая будет показана в разработанном алгоритме.

Проведенный анализ релевантных работ и сервисов говорит об отсутствии готовых и общедоступных алгоритмов для задачи построения оптимального плана дозаправок вдоль фиксированного маршрута с подтвержденной оптимальностью решения. При этом методы многомерного динамического программирования выглядят предпочтительнее рассмотренных подходов, основанных на теории графов, эвристической оптимизации и линейном программировании, поскольку позволяют получать оптимальное решение за полиномиальное время от числа узлов маршрута, а также эффективно переиспользовать данные о ранее вычисленных планах дозаправок и гарантировать целочисленность компонент оптимального плана. Для решения поставленной задачи рассмотрим точный полиномиальный алгоритм, основанный на методе двумерного динамического программирования, позволяющий получить оптимум целевой функции, то есть минимальный объем средств, необходимых для преодоления заданного маршрута, а также полиномиальный алгоритм, позволяющий восстановить сам план дозаправок.

Алгоритм нахождения оптимума

На основе поставленной задачи построения оптимального плана дозаправок сформулируем рекурсивное уравнение Беллмана. Построим алгоритм восходящего динамического программирования, описывающий метод получения решений этого уравнения для дискретных состояний. В соответствии с принципом оптимальности Беллмана алгоритм будет гарантировать построение оптимального плана, если множество допустимых планов для входных данных не пусто.

Введем целевую вещественную функцию $\delta(i, j)$, определенную на дискретном множестве *состояний динамики* $\Omega = [0, N-1] \times [1, V_{\max}]$ и отвечающую за минимальную суммарную стоимость топлива для достижения i-ого узла маршрута с остатком j делений топлива в баке. Подразумевается, что состояния, при которых второе измерение равно нулю (бак пуст) не рассматриваются как достижимые из соображений безопасности: велик риск остаться без топлива, не доехав до ближайшей заправки.

Переходом между состояниями из Ω будем считать либо атомарное передвижение от одного узла к соседнему следующему, при котором расходуется ровно одно деление бака, либо дозаправку в одном из узлов на одно деление. При этом предположим, что переход первого вида бесплатный, поскольку деньги не тратятся на заправку, а второй будет равен стоимости заправки одного деления в этом узле. Таким образом, до состояния (i, j) можно добраться из состояния $(i-1, j+1)$ без дозаправки в i-ом узле, либо из состояния $(i, j-1)$, заправившись на одно дополнительное деление. Необходимо отметить, что любой допустимый способ достижения конечной точки маршрута, подразумевающий только целые значения компонент вектора $\mathbf{F}$, можно представить в виде конечной последовательности двух перечисленных переходов.

Искомое рекурсивное уравнение Беллмана имеет вид:

$$\delta(i, j) = \min \begin{cases} \delta(i-1, j+1) \\ \delta(i, j-1) + \mathbf{C}[i] \end{cases},$$

где $\mathbf{C}[i]$ — минимальная стоимость заправки одного деления подходящим топливом на сопоставленных i-ому узлу заправках. Для корректности записи уравнения примем значения функции δ на состояниях, не входящих в Ω, равными *inf*.

Построим алгоритм восходящего динамического программирования, описывающий метод нахождения решений уравнения Беллмана, т. е. саму функцию δ на всей области определения, и значение $\delta(N-1, V_F)$ в частности, которое является оптимумом задачи (либо говорит об отсутствии допустимых планов в случае равенства *inf*).

Пусть матрица $\mathbf{D}$ размером $N \times V_{\max}$ отвечает за значение $\delta(i, j)$ для каждого состояния (i, j) из Ω. Таким образом, $\mathbf{D}[i][j]$ отвечает за минимальную стоимость, за которую можно добраться до i-ого узла маршрута с заполненным ровно на $j/V_{\max}$ баком. Необходимые состояния и соответствующие им оптимальные значения целевой функции δ можно представить в виде матрицы:

$$\delta = \begin{pmatrix} \mathbf{D}[0][1] & \cdots & \mathbf{D}[N-1][1] \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{D}[0][V_{\max}] & \cdots & \mathbf{D}[N-1][V_{\max}] \end{pmatrix}.$$

Для вычисления значения $\mathbf{D}[i][j]$ требуется понять, по какому переходу из двух доступных выгоднее попасть в это состояние, т. е. найти:

$$\mathbf{D}[i][j] = \min(\mathbf{D}[i-1][j+1], \mathbf{D}[i][j-1] + \mathbf{C}[i]).$$

Пересчет матрицы оптимальных значений целевой функции $\mathbf{D}$ будет происходить сверху вниз для каждого столбца слева направо. Для вычисления оптимальных значений для всего набора состояний требуется в качестве входных данных задать значение $\mathbf{D}[0][V_S]$, равное нулю, поскольку автомобиль изначально находится в состоянии $(0, V_S)$, и за это не надо платить. Остальные

значения матрицы **D** изначально будут равны *inf*, поскольку на момент начала расчета значений **D** они недостижимы. После расчета значений всех достижимых состояний в последнем столбце **D** будет указана информация о стоимости поездки для $V_{\max}$ возможных итоговых уровней топлива. Алгоритм пересчета можно представить на псевдокоде следующим образом:

```
for (i = 1; i < N; i + +){
   D[i][1] = D[i − 1][2];
   for (j = 2; j < V_max; j + +){
      D[i][j] = min(D[i − 1][j + 1],
      D[i][j − 1] + C[i];
   }
   D[i][V_max] = D[i][V_max − 1] + C[i];
}
```

Алгоритм описывает поиск решений уравнения Беллмана, задающихся значением V_S числа делений бака в начале пути, поскольку полученные функции δ удовлетворяют уравнению в каждой точке Ω по построению. Таким образом, в случае достижимости состояния ($N-1$, V_F) при изначально заданных V_S и V_F можно говорить об оптимальности значения стоимости заправленного на протяжении всего пути топлива, хранящегося в $\mathbf{D}[N-1][V_F]$.

Решение, полученное с помощью приведенного алгоритма, подразумевает только целые компоненты вектора **F**, поскольку имеющиеся переходы позволяют заправляться только на целое число делений. На самом деле, оптимальный план дозаправок может содержать нецелые компоненты, например, при равной стоимости топлива на всех заправках. Однако, можно строго показать, что среди множества оптимальных планов, если оно не пусто, должен быть план с исключительно целочисленными компонентами.

Предположим, что все оптимальные планы содержат хотя бы одну нецелую компоненту. Поскольку значения V_F и V_S целочисленные, исходя из последнего равенства в ограничениях сформулированной задачи, сумма нецелых компонент вектора **F** должна быть целой, значит, их не меньше двух. Рассмотрев две ближайшие к началу маршрута нецелые компоненты вектора **F**, можно убедиться, что полученный план либо не является оптимальным, поскольку можно без потери допустимости плана снизить итоговую стоимость, перегруппировав нецелые компоненты (в случае неравенства цен в соответствующих узлах), либо (в случае равенства цен) снизить количество нецелых компонент вектора **F** хотя бы на одну. Проведя подобную манипуляцию с двумя ближайшими к началу маршрута компонентами достаточное количество раз, можно получить план, состоящий из целочисленных координат (опровергнув изначальное предположение) или показать, что множество оптимальных планов пусто.

Асимптотическая сложность данного алгоритма — $O(N \times V_{\max})$, потому что на каждый из N столбцов уходит не более $O(V_{\max})$ операций сравнения. Поскольку объем одного деления топлива, который требуется для преодоления расстояния между соседними узлами, линейно зависит от числа узлов, на который разбивается заданный, фиксированный по длине маршрут, можно утверждать, что количество делений $V_{\max}$ линейно зависит от числа узлов N. Поэтому сложность предложенного алгоритма можно оценить как $O(N^2)$.

В случае достижения допустимого состояния оптимальный план дозаправок можно восстановить, используя вспомогательную таблицу переходов *prev*, которая параллельно заполняется в процессе пересчета динамики. При этом для каждого состояния динамики запоминается, был ли совершен переход без дозаправки или с заправкой на одно деление топлива. Обратным проходом по таблице *prev* с аналогичной оценкой сложности $O(N^2)$ восстанавливается последовательность заправок, соответствующая минимальной стоимости.

Итак, в зависимости от требуемого конечного объема топлива V_F, значение $\mathbf{D}[N-1][V_F]$ является оптимумом для поставленной задачи или говорит о том, что требуемое состояние недостижимо. Таким образом, был разработан полиномиальный алгоритм вычисления оптимума для задачи поиска оптимального плана дозаправок, а также предложен полиномиальный алгоритм восстановления оптимального плана по вспомогательной таблице переходов *prev*. Была показана корректность алгоритма, оптимальность получаемых решений задачи оптимизации, а также целочисленность компонент оптимального плана.

Тестирование

В рамках исследования был проведен сравнительный анализ точных алгоритмов для решения задачи поиска оптимума на основе методов оптимизации, приведенных в разделе «Обзор релевантных работ». В частности, были получены оценки сложности алгоритмов по времени, на основе которых сделан вывод о превосходстве подхода динамического программирования при решении поставленной задачи.

Первые рассматриваемые алгоритмы опираются на применение алгоритмов поиска кратчайшего пути для сетевой структуры направленного взвешенного

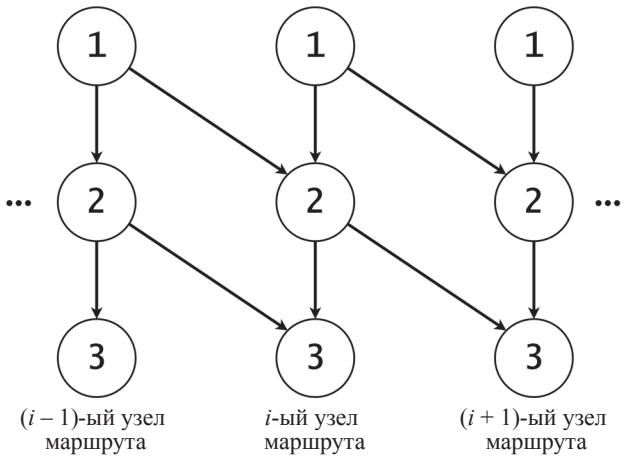


Рисунок. Сетевая структура графа для решения задачи оптимизации плана

Figure. Network graph structure for solving the plan optimization problem

графа, где каждому узлу маршрута соответствует несколько состояний (вершин графа), отвечающих за уровень топлива в баке, расположенных на рисунке. Направленные взвешенные ребра отвечают за возможные переходы между состояниями, причем их веса соответствуют весам переходов, определенных в разделе «Алгоритм нахождения оптимума» (алгоритма восходящей динамики). Схожий подход с сетевой структурой графа применяется в исследованиях [8, 9].

Поскольку было показано, что число делений бака $V_{\max}$ линейно зависит от числа узлов маршрута N, то число вершин в подобной структуре будет составлять $O(N^2)$. Заметим, что число ребер не превышает удвоенного числа вершин, поэтому число ребер тоже можно оценить как $O(N^2)$. В связи с этим в зависимости от реализации алгоритма Дейкстры ($O(V\log_2(V) + E\log_2(V))$ для разреженных и $O(V^2 + E)$ для плотных графов, где V — число вершин, E — число ребер в графе, сложность полученных алгоритмов составит ($O(N^2\log_2(N))$ или $O(N^4)$ соответственно. Использование иных алгоритмов поиска кратчайшего пути взамен алгоритма Дейкстры, например, алгоритма Форда–Беллмана [10], избыточно, поскольку граф не содержит ребер отрицательного веса. Плюсом графового подхода является сохранение целочисленности компонент оптимального плана за счет дискретности состояний.

Другой подход заключается в решении задачи линейного программирования, целевая функция и ограничения которой были сформулированы в разделе «Обзор релевантных работ». И число ограничений d, и число переменных n для такой задачи можно оценить как $O(N)$, где N — число узлов маршрута. Тогда асимптотическая сложность одной итерации классического симплекс-метода составит $O(N^3)$ [15], не говоря о нарушении целочисленности компонент оптимального плана. Рандомизированный симплекс-метод [6, 7] позволит снизить оценку сложности, которая зависит от числа ограничений d, числа переменных n и стандартного отклонения случайных возмущений σ, применяемых к данным [7]. Однако он не гарантирует решение задачи целочисленного программирования без потери оптимальности за полиномиальное время [15].

В таблице приведены результаты сравнительного анализа известных подходов и предложенного алгоритма, по которым можно сделать вывод о превосходстве предложенного метода при решении поставленной задачи, так как рассмотренные аналоги либо не соблюдают требования целочисленности компонент оптимального решения, либо имеют более высокую асимптотическую сложность по времени.

Обсуждение

Число дозаправок вдоль маршрута в приведенной постановке задачи ограничивается сверху только минимумом из общего числа заправок и числа точек маршрута. Предполагается, что число дозаправок в реализуемом на практике маршруте не должно быть велико, даже если кажется, что так дешевле: частые отклонения от маршрута до ближайшей заправки подразумевают не столько дополнительный расход топлива, сколько потерю времени в очередях (особенно в час пик) и повышение вероятности мелких ДТП. В работе [16] был приведен алгоритм динамического программирования, позволяющий учитывать это ограничение. Однако на данный момент не проводились ни оценка того, насколько оптимум задачи с ограничением отличается от оптимума задачи без ограничения, ни сравнение числа дозаправок в оптимальном плане с минимально возможным числом дозаправок, необходимых для преодоления маршрута.

Другим важным направлением исследований является учет факторов, влияющих на расход топлива. Существующие исследования [2, 3] показывают, что подход с постоянным на всем протяжении пути расходом топлива, который использовался при постановке задачи оптимизации, не является точным. Например, в [3] показано, что внешние факторы повышают расход топлива у дизельного автобуса на 18–74 % относительно нормы. Кроме того, Минтранс России заявляет[1] о повышении расхода топлива вплоть до 35 % в зависимости от рассматриваемых факторов, включающих категорию используемой дороги, численность населения ближайших населенных пунктов, состояние автомобиля и даже высоту над уровнем моря.

Учет динамического расхода топлива, изменяющегося под воздействием внешних факторов, вероятно потребует повышения размерности задачи. Однако, как

[1] Нормы расхода топлив на автомобильном транспорте по данным Минтранса России [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_76009/82bf9cc78a60bfd08d52fecd2b37de9f9f844a9f/ (дата обращения: 17.07.2025).

Таблица. Сравнение известных подходов решения поставленной задачи оптимизации

Table. Comparison of known approaches to solving the optimization problem

Алгоритм	Средняя сложность по времени	Целочисленность компонент оптимального плана
Алгоритм Дейкстры для разреженных графов для сетевой структуры [12, 13]	$O(N^2\log_2(N))$	Сохраняется
Алгоритм Дейкстры для плотных графов для сетевой структуры [12, 13]	$O(N^4)$	Сохраняется
Классический симплекс-метод [15]	$O(N^3)$ для одной итерации	Не сохраняется
Рандомизированный симлекс-метод [10, 11]	$O(d, n, \sigma)$	Не сохраняется
Предложенный метод	$O(N^2)$	Сохраняется

показывают исследования [16], повышение размерности задачи, такое как ограничение на число дозаправок, не всегда связано с переходом на эвристические методы и последующей потерей оптимальности решений. В дальнейших исследованиях при решении подобных низкоразмерных задач точными методами можно использовать различные оптимизации пересчета динамики по слоям, включая дискретный метод Лагранжа [17], которые позволят снизить асимптотическую сложность алгоритма.

Возможно применение полученных оптимизационных алгоритмов в задаче построения многозвенных маршрутов транспортировки, которые позволяют минимизировать расходы на перевозку груза путем разбиения маршрута на несколько участков, за каждый из которых несут ответственность разные транспортные компании [18].

Заключение

В рамках исследования была сформулирована задача комбинаторной условной оптимизации, связанная с выбором оптимального с точки зрения стоимости плана дозаправок вдоль заданного маршрута, а также исследованы точные методы ее решения. Показано, что методы динамического программирования в сравнении с методами линейного программирования и графовыми методами лучше учитывают специфику разрабатываемого сервиса за счет переиспользования результатов промежуточных подзадач. Предложенные алгоритмы позволяют решать задачу поиска и восстановления оптимального плана дозаправок за время, полиномиальное от числа точек предварительно дискретизированного маршрута, которое оценивается как $O(N^2)$, где N равно числу узлов маршрута. Помимо корректности алгоритма динамического программирования приведены рассуждения, показывающие оптимальность получаемых решений и целочисленность их компонент.

В дальнейшем планируется продолжить исследования, связанные с влиянием ограничения на число остановок сверху на итоговую стоимость поездки, а также исследования, связанные с учетом динамического расхода топлива, зависящего от различных внешних факторов, с целью повысить точность модели. Также планируется осуществить запуск тестового прототипа сервиса оценки стоимости поездки на автомобиле в рамках логистического портала Cargotime.ru.

Литература

1. Kovács G. Optimization method and software for fuel cost reduction in case of road transport activity // Acta Polytechnica. 2017. N 57. N 3. P. 201–208. https://doi.org/10.14311/AP.2017.57.0201
2. Goryaev N.K., Khabibullozoda Kh.Kh., Faizalizoda F.H. Research of factors affecting yrucks fuel consumption: review // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. V. 666. P. 042056. https://doi.org/10.1088/1755-1315/666/4/042056
3. Chikishev E., Chainikov D. Assessment of external factors influence on the fuel consumption of a diesel bus operating on a city route // Transportation Research Procedia. 2022. V. 61. P. 354–360. https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.01.057
4. Rizzoli A., Casagrande N., Donati A.V., Gambardella L.M., Lepori D., Montemanni R., Pina P., Zaffalon M. Planning and optimisation of vehicle routes for fuel oil distribution // Proc. of the MODSIM International Congress on Modelling and Simulation. 2003. P. 1–6.
5. Pérez M.A.J, Loaiza R.E.P., Flores P.M.Q, Ponce O.A., Peralta C.F. A heuristic algorithm for the routing and scheduling problem with time windows: a case study of the automotive industry in Mexico // Algorithms. 2019. V. 12. N 5. P. 111. https://doi.org/10.3390/a12050111
6. Kelner J.A., Spielman D.A. A randomized polynomial-time simplex algorithm for linear programming // Proc. of the 38th Annual ACM Symposium on Theory of Computing. 2006. P. 51–60. https://doi.org/10.1145/1132516.1132524
7. Spielman D.A., Teng S.-H. Smoothed analysis of algorithms: why the simplex algorithm usually takes polynomial time // Journal of the ACM. 2001. V. 51. N 3. P. 385–463. https://doi.org/10.1145/990308.990310
8. Wang H., Mao W., Eriksson L. A Three-Dimensional Dijkstra's algorithm for multi-objective ship voyage optimization // Ocean Engineering. 2019. V. 186. P. 106131. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.106131
9. Xu B., Chen X., Li K., Hu M., Bian Y., Yu Q., Wang J. Double-layer speed optimization for reducing fuel consumption with vehicle-to-infrastructure communication // Journal of Intelligent Transportation Systems: Technology, Planning and Operations. 2019. V. 23. N 5. P. 513–524. http://doi.org/10.1080/15472450.2019.1578565
10. Abousleiman R., Rawashdeh O. A Bellman-Ford approach to energy efficient routing of electric vehicles // Proc. of the IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC). 2015. P. 1–4. https://doi.org/10.1109/ITEC.2015.7165772

References

1. Kovács G. Optimization method and software for fuel cost reduction in case of road transport activity. *Acta Polytechnica*, 2017, no. 57, no. 3, pp. 201–208. https://doi.org/10.14311/AP.2017.57.0201
2. Goryaev N.K., Khabibullozoda Kh.Kh., Faizalizoda F.H. Research of factors affecting yrucks fuel consumption: review. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, vol. 666, pp. 042056. https://doi.org/10.1088/1755-1315/666/4/042056
3. Chikishev E., Chainikov D. Assessment of external factors influence on the fuel consumption of a diesel bus operating on a city route. *Transportation Research Procedia*, 2022, vol. 61, pp. 354–360. https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.01.057
4. Rizzoli A., Casagrande N., Donati A.V., Gambardella L.M., Lepori D., Montemanni R., Pina P., Zaffalon M. Planning and optimisation of vehicle routes for fuel oil distribution. *Proc. of the MODSIM International Congress on Modelling and Simulation*, 2003, pp. 1–6.
5. Pérez M.A.J, Loaiza R.E.P., Flores P.M.Q, Ponce O.A., Peralta C.F. A heuristic algorithm for the routing and scheduling problem with time windows: a case study of the automotive industry in Mexico. *Algorithms*, 2019, vol. 12, no. 5, pp. 111. https://doi.org/10.3390/a12050111
6. Kelner J.A., Spielman D.A. A randomized polynomial-time simplex algorithm for linear programming. *Proc. of the 38th Annual ACM Symposium on Theory of Computing*, 2006, pp. 51–60. https://doi.org/10.1145/1132516.1132524
7. Spielman D.A., Teng S.-H. Smoothed analysis of algorithms: why the simplex algorithm usually takes polynomial time. *Journal of the ACM*, 2001, vol. 51, no. 3, pp. 385–463. https://doi.org/10.1145/990308.990310
8. Wang H., Mao W., Eriksson L. A Three-Dimensional Dijkstra's algorithm for multi-objective ship voyage optimization. *Ocean Engineering*, 2019, vol. 186, pp. 106131. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.106131
9. Xu B., Chen X., Li K., Hu M., Bian Y., Yu Q., Wang J. Double-layer speed optimization for reducing fuel consumption with vehicle-to-infrastructure communication. *Journal of Intelligent Transportation Systems: Technology, Planning and Operations*. 2019, vol. 23, no. 5, pp. 513–524. http://doi.org/10.1080/15472450.2019.1578565
10. Abousleiman R., Rawashdeh O. A Bellman-Ford approach to energy efficient routing of electric vehicles. *Proc. of the IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)*, 2015, pp. 1–4. https://doi.org/10.1109/ITEC.2015.7165772

11. Hossain M.A., Ahmedy I., Harith M.Z., Idris M., Soon T.K., Noor R.M., Yusoff S.B. Route optimization by using Dijkstra's algorithm for the waste management system // Proc. of the 3rd International Conference on Information Science and Systems. 2020. P. 110–114. https://doi.org/10.1145/3388176.3388186
12. Корепанова А.А., Есин М.С., Сабреков А.А. Подходы к разработке сервиса учета расходов на топливо и маршрутной адаптации с учетом пользовательских параметров // Региональная информатика и информационная безопасность: Сборник трудов. 2023. № 12. С. 294–297.
13. Zhang Y., Cao W., Zhao H., Gao S. Route planning algorithm based on dynamic programming for electric vehicles delivering electric power to a region isolated from power grid // Artificial Life and Robotics. 2023. V. 28. N 3. P. 583–590. https://doi.org/10.1007/s10015-023-00879-7
14. Choi G.-H., Lee W., Kim T. Voyage optimization using dynamic programming with initial quadtree based route // Journal of Computational Design and Engineering. 2023. V. 10. N 3. P. 1185–1203. https://doi.org/10.1093/jcde/qwad055
15. Bazaraa M., Jarvis J., Sherali H. Linear Programming and Network Flows. John Wiley & Sons, 2009. 768 p.
16. Zolotykh D.A., Sabrekov A.A., Esin M.S., Korepanova A.A. Automating the construction of an optimal refuelling plan along a car route taking into account the limit on the number of stops // Proc. of the 27th International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM). 2024. P. 389–392. https://doi.org/10.1109/SCM62608.2024.10554122
17. Hou J., Zhai Q., Zhou Y., Guan X. A fast solution method for large-scale unit commitment based on lagrangian relaxation and dynamic programming // IEEE Transactions on Power Systems. 2024. V. 39. N 2. P. 3130–3140. https://doi.org/10.1109/TPWRS.2023.3287199
18. Есин М.С., Корепанова А.А., Сабреков А.А. Агрегация и анализ сведений логистических компаний для построения сложного маршрута перевозки груза // Программные продукты и системы. 2023. № 2. С. 309–319. https://doi.org/10.15827/0236-235X.142.309-319

11. Hossain M.A., Ahmedy I., Harith M.Z., Idris M., Soon T.K., Noor R.M., Yusoff S.B. Route optimization by using Dijkstra's algorithm for the waste management system. *Proc. of the 3rd International Conference on Information Science and Systems*, 2020, pp. 110–114. https://doi.org/10.1145/3388176.3388186
12. Korepanova A., Esin M., Sabrekov A. Approaches to the development of a fuel cost accounting and route adaptation service according to user parameters. *Proc. of the Regional Informatics and Information Security*, 2023, no. 12, pp. 294–297. (in Russian)
13. Zhang Y., Cao W., Zhao H., Gao S. Route planning algorithm based on dynamic programming for electric vehicles delivering electric power to a region isolated from power grid. *Artificial Life and Robotics*, 2023, vol. 28, no. 3, pp. 583–590. https://doi.org/10.1007/s10015-023-00879-7
14. Choi G.-H., Lee W., Kim T. Voyage optimization using dynamic programming with initial quadtree based route. *Journal of Computational Design and Engineering*, 2023, vol. 10, no. 3, pp. 1185–1203. https://doi.org/10.1093/jcde/qwad055
15. Bazaraa M., Jarvis J., Sherali H. *Linear Programming and Network Flows*. John Wiley & Sons, 2009, 768 p.
16. Zolotykh D.A., Sabrekov A.A., Esin M.S., Korepanova A.A. Automating the construction of an optimal refuelling plan along a car route taking into account the limit on the number of stops. *Proc. of the 27th International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM)*, 2024, pp. 389–392. https://doi.org/10.1109/SCM62608.2024.10554122
17. Hou J., Zhai Q., Zhou Y., Guan X. A fast solution method for large-scale unit commitment based on lagrangian relaxation and dynamic programming. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2024, vol. 39, no. 2, pp. 3130–3140. https://doi.org/10.1109/TPWRS.2023.3287199
18. Esin M.S., Korepanova A.A., Sabrekov A.A. Aggregation and analysis of information from logistics companies to build a complex cargo transportation route. *Software & Systems*, 2023, vol. 36, no. 2, pp. 309–319. (in Russian). https://doi.org/10.15827/0236-235X.142.309-319

Авторы

Есин Максим Сергеевич — младший научный сотрудник, Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук, Санкт-Петербург, 199178, Российская Федерация, SC 58493347500, https://orcid.org/0000-0003-1011-9788, mse@dscs.pro
Абрамов Максим Викторович — кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук, Санкт-Петербург, 199178, Российская Федерация, SC 56938320500, https://orcid.org/0000-0002-5476-3025, mva@dscs.pro

Authors

Maxim S. Esin — Junior Researcher, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS), Saint Petersburg, 199178, Russian Federation, SC 58493347500, https://orcid.org/0000-0003-1011-9788, mse@dscs.pro
Maxim V. Abramov — PhD, Leading Researcher, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS), Saint Petersburg, 199178, Russian Federation, SC 56938320500, https://orcid.org/0000-0002-5476-3025, mva@dscs.pro

Статья поступила в редакцию 11.12.2024
Одобрена после рецензирования 25.06.2025
Принята к печати 26.07.2025

Received 11.12.2024
Approved after reviewing 25.06.2025
Accepted 26.07.2025

Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ
июль–август 2025 Том 25 № 4 http://ntv.ifmo.ru/
SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL OF INFORMATION TECHNOLOGIES, MECHANICS AND OPTICS
Jule–August 2025 Vol. 25 No 4 http://ntv.ifmo.ru/en/
ISSN 2226-1494 (print) ISSN 2500-0373 (online)

doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-4-789-796
УДК 51-74; 004.02

Вейвлеты Эрмита–Гаусса: синтез дискретных форм и исследование свойств

Алексей Юрьевич Гришенцев[1]✉, Николай Владимирович Коровкин[2], Данил Павлович Островский[3]

[1,3] Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация
[2] Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, 195251, Российская Федерация

[1] AGrishentsev@yandex.ru✉, https://orcid.org/0000-0003-1373-0670
[2] Nikolay.Korovkin@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-1173-8727
[3] dan97_@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-5397-5475

Аннотация

Введение. Изложены результаты исследований собственных векторов и вектор-функций дискретного и непрерывного преобразования Фурье. Известно, что такими собственными векторами являются произведения функции Гаусса на полиномы Эрмита, предлагается название для полученных на основе указанного произведения функций: вейвлеты Эрмита–Гаусса. **Метод.** В работе применены методы математического анализа непрерывных функций и численные методы для исследования свойств и методов синтеза собственных векторов и вектор-функций дискретного и непрерывного преобразования Фурье. **Основные результаты.** Получены выражения вычисления масштабного параметра и нормирующего множителя для дискретных форм вейвлетов Эрмита–Гаусса. Выполненные исследования позволяют утверждать, что масштабный параметр дискретной формы вейвлетов Эрмита–Гаусса зависит от числа отсчетов, а норма зависит от числа отсчетов и номера вейвлета. Сформирована форма матриц преобразования Фурье, обладающая хорошей обусловленностью при вычислении собственных векторов в форме вейвлетов Эрмита–Гаусса. **Обсуждение.** Вейвлеты Эрмита–Гаусса образуют базис, и потому могут быть использованы в задачах декомпозиции и синтеза сигналов. При выборе материнского вейвлета для декомпозиции и синтеза в первую очередь следует руководствоваться особенностями и свойствами образуемых им форм. Отмечено, что для некоторых сигналов могут дать компактное разложение вейвлеты Морле или Добеши, для других — вейвлеты Хара, есть и такие сигналы, для спектральной декомпозиции которых наиболее эффективны вейвлеты Эрмита–Гаусса.

Ключевые слова

вейвлеты, полиномы Эрмита, функция Гаусса, волновая функция, спектральная декомпозиция, собственные числа, собственные векторы, матрицы, преобразование Фурье, синтез оптимальных сигналов

Ссылка для цитирования: Гришенцев А.Ю., Коровкин Н.В., Островский Д.П. Вейвлеты Эрмита–Гаусса: синтез дискретных форм и исследование свойств // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2025. Т. 25, № 4. С. 789–796. doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-4-789-796

Hermite–Gauss wavelets: synthesis of discrete forms and investigation of properties

Alexey Yu. Grishentsev[1]✉, Nikolay V. Korovkin[2], Danil P. Ostrovskii[3]

[1,3] ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation
[2] Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, 195251, Russian Federation

[1] AGrishentsev@yandex.ru✉, https://orcid.org/0000-0003-1373-0670
[2] Nikolay.Korovkin@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-1173-8727
[3] dan97_@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-5397-5475

© Гришенцев А.Ю., Коровкин Н.В., Островский Д.П., 2025

Abstract
Considered new results of studies of eigenvectors and vector functions of discrete and continuous Fourier transforms. It is known that such eigenvectors are products of the Gauss function on Hermite polynomials, a name is proposed for the functions obtained on the basis of this product: Hermite-Gauss wavelets. In the paper studies on the base of mathematical analysis methods of continuous functions and numerical methods, the properties and methods of synthesis of eigenvectors and vector functions of discrete and continuous Fourier transforms are investigated. Expressions for calculating the scale parameter and the normalizing factor for discrete forms of Hermite-Gauss wavelets are obtained. The studies performed to prompt that the scale parameter of the discrete form of Hermite-Gauss wavelets depends on the number of samples, and the norm depends on the number of samples and the number of the wavelet. The form of the Fourier transform matrices is obtained which has good conditionality when calculating eigenvectors in the form of Hermite-Gauss wavelets. Hermite-Gauss wavelets form a basis, and therefore can be used in tasks of signal decomposition and synthesis. For choosing a mother wavelet for decomposition and synthesis, firstly one should be guided by the features and properties of the shapes formed by it. For some signals, Morlaix or Daubechy wavelets can give compact decomposition, for others, Hare wavelets, and there are also signals for which Hermite-Gauss wavelets are most effective for spectral decomposition.

Keywords
wavelets, Hermite polynomials, Gauss function, wave function, spectral decomposition, eigenvalues, eigenvectors, matrices, Fourier transform, synthesis of optimal signals

For citation: Grishentsev A.Yu., Korovkin N.V., Ostrovskii D.P. Hermite-Gauss wavelets: synthesis of discrete forms and investigation of properties. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2025, vol. 25, no. 4, pp. 789–796 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-4-789-796

Введение

Одной из актуальных задач цифровой и смешанной обработки и синтеза сигналов, является разработка функциональных форм называемых вейвлетами и обладающих сосредоточением энергии в частотном и временном пространствах одновременно. Интересно получение и исследование как непрерывных, так и дискретных форм. В задачах обработки сигналов [1] такие вейвлеты используются для построения фильтров [2], сжатия сигналов [3, 4], распознавания образов [5, 6], спектрально-пространственной декомпозиции [7, 8], в задачах радиосвязи подобные вейвлеты применимы для синтеза радиочастотных сигналов [9–13]. Свойством преобразования Фурье является неограниченность спектра ограниченной во времени функции и ограниченность спектра функции, неограниченной во временном пространстве. Это определяет невозможность существования функций, одновременно ограниченных в частотном и временном пространствах, но не запрещает существование функций, которые затухают относительно быстро, при удалении от области максимальных значений в данных пространствах. Анализ работ [14–16] показал, что на сегодняшний день существует достаточно много вейвлетов, обладающих указанным свойством, но обойдены вниманием вейвлет-функции, которые исследуются в настоящей работе. При этом есть основание полагать, что именно исследуемые функции являются оптимальными с точки зрения эквивалентности затухания в частотной и временной областях.

Определение вейвлет-функций

Предлагается следующая идея поиска вейвлетов. Пусть в гильбертовом пространстве задана матричная функция следующего вида: $(F(\omega, t)) = \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\exp(-j\omega t)\right)$, где $\omega = 2\pi f$ — круговая частота; t — время; $j = \sqrt{-1}$ — мнимая единица.

Тогда для собственных значений λ_v, $v \in \mathbb{N}$ и собственных векторов-функций $\psi(\omega, v)$ и $\psi(t, v)$, можно записать уравнение:

$$\lambda_v\psi(\omega, v) = \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega, t)\psi(t, v)dt. \quad (1)$$

Правую часть выражения (1) можно записать в виде:

$$\lambda_v\psi(\omega, v) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{\infty} \exp(-j\omega t)\psi(t, v)dt. \quad (2)$$

Несложно заметить, что $\psi(t, v)$ является собственной вектор-функцией матричной функции преобразования Фурье (2), что определяет соответствие форм $\psi(\omega, v)$ и $\psi(t, v)$, в том числе и затухание в частотном и временном пространствах соответственно.

Такая функция $\psi(t, v)$ — известна, это произведение полиномов Эрмита

$$H(t, v) = \sum_{k=0}^{v/2}\left((-1)^k\frac{v!}{k!(v-2k)!}(2t)^{v-2k}\right)$$

и функции Гаусса

$$G(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}\exp\left(-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}\right),$$

где μ — математическое ожидание; σ — среднеквадратическое отклонение. При $\mu = 0$ и $\sigma = 1$ получим:

$$G(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}}\exp\left(-\frac{t^2}{2}\right).$$

Назовем такие функции вейвлетами Эрмита–Гаусса.

Уравнения вейвлетов Эрмита–Гаусса $\psi(t, v)$ имеют следующий вид:

$$\begin{cases} \psi(t, v) = e^{-\frac{t^2}{2}}\sum_{k=0}^{v/2}\left((-1)^k\frac{v!}{k!(v-2k)!}(2t)^{v-2k}\right), \\ ||\psi|| = \sqrt{2^v v!\sqrt{\pi}}, \\ \overline{\psi}(t, v) = \frac{1}{||\psi||}\psi(t, v), \end{cases} \quad (3)$$

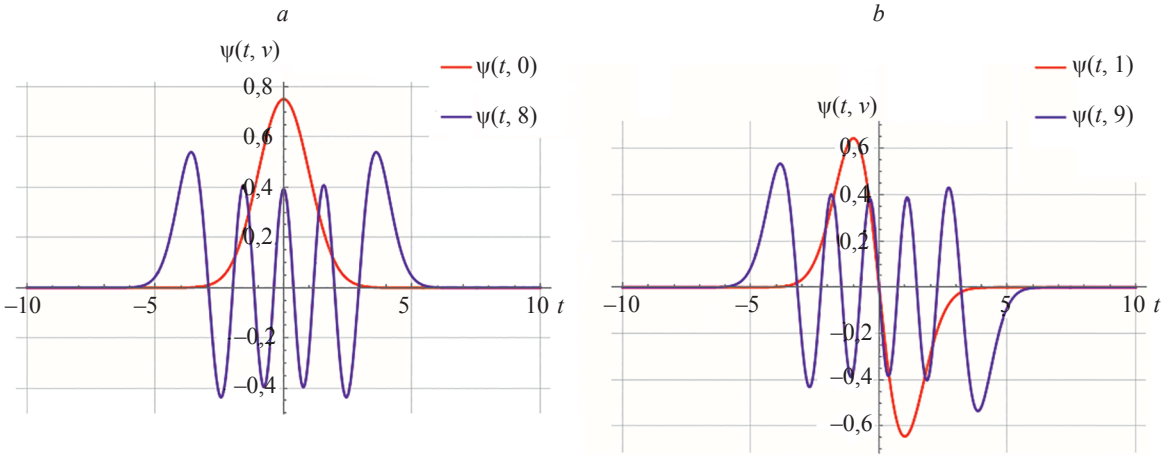


Рис. 1. Примеры графиков двух пар нормированных вейвлетов Эрмита–Гаусса: $\psi(t, 0)$, $\psi(t, 8)$ (*a*); $\psi(t, 1)$, $\psi(t, 9)$ (*b*)

Fig. 1. Examples of graphs of normalized Hermite-Gauss wavelets: a pair of wavelets $\psi(t, 0)$, $\psi(t, 8)$ (*a*); a pair of wavelets $\psi(t, 1)$, $\psi(t, 9)$ (*b*)

где $\psi(t, v)$ — не нормированная функция; $||\psi||$ — $L^2(\mathbb{R})$ норма функции $\psi(t, v)$; $\overline{\psi}(t, v)$ — нормированная функция; v — номер вейвлета Эрмита–Гаусса. На рис. 1 приведены примеры вейвлетов Эрмита–Гаусса.

В физике $\psi(t, v)$ называется волновой функцией и является решением уравнения Шредингера [17, 18]. Собственные числа λ_v в (1) и (2) образованы циклической последовательностью $(1, -j, 1, j, -1, -j, \ldots)$, выражаются как $\lambda_v = (-j)^v$ и являются кратными корнями векового уравнения матрицы $\left(\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\exp(-j\omega t)\right)$. Отметим, что $|\lambda_v| = 1$, в силу того, что эта матрица является унитарной, так как $\left|\det\left(\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\exp(-j\omega t)\right)\right| = 1$. Семейство функций (3) образует ортонормированный базис в пространстве $L^2(\mathbb{R})$, т. е. $\int\limits_{-\infty}^{\infty} \overline{\psi}(t, v)\,\overline{\psi}(t, q)dt = \delta_q^v$, где $\delta_q^v = \begin{cases} 1, v = q \\ 0, v \neq q \end{cases}$ — символ Кронекера, а потому является единственным решением уравнения (2). Подчеркнем, что $\lim\limits_{t\to\pm\infty} \psi(t, v) \to 0$, т. е. при любом значении v (включая $v \to \infty$) значение функции $\psi(t, v)$ стремиться к нулю при неограниченном удалении от начала координат. Таким образом, $\overline{\psi}(t, v)$ образуют семейство вейвлет-функций и одновременно являются собственными вектор-функциями преобразования Фурье. Функция $\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\psi(t, v)$ при $v = 0$ образует распределение Гаусса $\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\psi(t, v) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}}\exp\left(-\frac{t^2}{2}\right)$, $t \in (-\infty, \infty)$ с математическим ожиданием $\mu = 0$ и стандартным отклонением $\sigma = 1$; при $v = 1$ функция $\frac{1}{2}\psi(t, v)$ образует распределение Релея $\frac{1}{2}\psi(t, v) = t\exp\left(-\frac{t^2}{2}\right)$, $t \in (0, \infty)$, с модой $\sigma = 1$ и математическим ожиданием $\sqrt{\frac{\pi}{2}}$. Совокупность перечисленных свойств позволяет ожидать эффективного применения исследуемых вейвлетов в различных задачах анализа и синтеза дискретных и непрерывных сигналов.

Собственные векторы конечномерной формы матрицы преобразования Фурье

Одна из наиболее часто используемых форм матриц преобразования Фурье [19] имеет вид:

$$\mathbf{V} = \left(\frac{1}{\sqrt{N}}\exp\left(-\frac{j2\pi nm}{N}\right)\right),\ n, m = \overline{0, N-1}, \qquad (4)$$

где n и m — индексы строк и столбцов матрицы $\mathbf{V}$. Матрица преобразования Фурье $\mathbf{V}$ является: симметрической, т. к. $\mathbf{V}^T = \mathbf{V}$; нормальной, т. к. $\mathbf{V}^H\mathbf{V} = \mathbf{V}\mathbf{V}^H$, где $\mathbf{V}^H$ — матрица эрмитово-сопряженная к $\mathbf{V}$; унитарной в силу $|\det(\mathbf{V})| = 1$; не эрмитовой, т. к. $\mathbf{V}^H \neq \mathbf{V}$.

Для оценки ошибки вычисления собственных значений матрицы, в зависимости от ее возмущения, вводят понятие обусловленности. Понятие обусловленности матрицы при вычислении собственных значений отличается от обусловленности при решении систем линейных уравнений, так как задача вычисления собственных значений в общем случае сводится к определению корней нелинейного полинома. При решении задачи определения собственных векторов и собственных чисел нормальных матриц различают обусловленность при малых возмущениях (возмущениях высших порядков) и относительно больших возмущениях (возмущениях первого порядка). Возмущения высших порядков обычно ассоциируют с машинной точностью записи чисел с плавающей точкой. Следует отметить, что критерий хорошей или плохой обусловленности матрицы по отношению к собственным значениям, может не совпадать с критерием обусловленности по отношению к задаче вычисления собственных векторов, так как задача вычисления собственных векторов (при известных собственных значениях) сводится к решению системы линейных уравнений [20]. Например, матрица $\mathbf{V}$ относится к классу матриц, которые хорошо обусловлены

по отношению к задаче на собственные значения, но за счет близких по величине собственных значений плохо обусловлена по отношению к задаче на собственные векторы. Исследования подтверждают, что матрица **V** плохо обусловлена для задачи вычисления собственных векторов, и возмущения $\Delta\mathbf{V}$ высших порядков матрицы **V** не позволяют получить адекватные величины собственных векторов.

Относительная ошибка расчета собственных векторов для произвольной симметрической матрицы **H** [20, 21] может быть оценена с помощью следующего выражения:

$$\Delta = \frac{||\Delta\boldsymbol{\psi}||}{||\boldsymbol{\psi}||} \le ||\Delta\mathbf{H}|| \sum_{\substack{q=1,\\ v\ne q}}^{N} \frac{1}{|\lambda_q - \lambda_v|}, \qquad (5)$$

где $\boldsymbol{\psi}$ — собственный вектор; $\Delta\boldsymbol{\psi}$ — ошибки собственного вектора для матрицы **H**; $\Delta\mathbf{H}$ — матрица возмущения ($\mathbf{H} + \Delta\mathbf{H}$); λ_q, λ_v, q, $v = \overline{0, N-1}$ — собственные числа матрицы **H**.

Запишем выражение для модифицированной матрицы (4):

$$\mathbf{F} = \frac{1}{\sqrt{N}} \exp\left(-\frac{j(\pi \pm \varepsilon)(2n - N + 1)(2m - N + 1)}{2N}\right), \quad n, m = \overline{0, N-1}, \qquad (6)$$

где ε — аддитивная компонента аргумента, возмущающая матрицу **F**. Матрица **F**, так же, как и **V**, является: симметрической, нормальной, унитарной, не эрмитовой. Матрица (6) позволяет получать вектор преобразования Фурье с нулевой частотой по центру, и расположенными по возрастанию от центра положительными частотами справа и отрицательными — слева, соответственно, т. е. в виде который обеспечит соответствие формы функции $\psi(t, v)$ и ее дискретного преобразования Фурье $\mathcal{F}\{\psi(t, v)\}$.

Обусловленность матрицы (6) в задачах собственных значений и собственных векторов аналогична обусловленности матрицы (4), т. е. матрица **F** имеет хорошую обусловленность для задачи собственных значений. При возмущениях высших порядков матрицы **F** собственные значения λ_v также имеют возмущения высших порядков, т. е. $|\lambda_v| \ne 1$, что, в свою очередь, дает $|\lambda_q - \lambda_v| \approx 0 \Rightarrow |\lambda_q - \lambda_v|^{-1} \to \infty$ при некоторых значениях q и v. Следовательно, для матрицы **F** среди слагаемых (5) будут встречаться величины, близкие по значению к максимальным в используемом формате или переполнения (infinity — в формате стандарта IEEE 754[1]), что, в свою очередь, ухудшает обусловленность матрицы **F** в задаче вычисления собственных векторов. Заметим, что для матриц **V** и **F** при вычислениях собственных чисел λ_v они принимают значения, близкие с машинной точностью к элементам множества $\{-1, -j, 1, j\}$, но не упорядоченные по правилу $(-j)^v$.

При относительно малых возмущениях первого порядка $\Delta\mathbf{F}$ и относительно небольших размерах матрицы **F** ошибка вычисления собственных значений возрастает, но может быть допустимой, и потому возрастает величина $|\lambda_q - \lambda_v|$, что способствует уменьшению знаменателя (5), и следовательно приводит к снижению относительной ошибки Δ. Дальнейшее увеличение возмущения $\Delta\mathbf{F}$ или увеличение размеров матрицы (6) приведет к недопустимому росту ошибки Δ. Например, в вычислительных экспериментах с матрицей (6) использовались возмущения порядка $\varepsilon \approx \pm(10^{-7}–10^{-3})$. Исследования показали, что при малых размерах матрицы **F** ($N \sim 2^2–2^5$) можно улучшить обусловленность за счет некоторого возмущения (первого порядка) матрицы **F**, например, с помощью задания не нулевого значения ε в (6). Но при увеличении размеров матрицы **F** или увеличении возмущения $\Delta\mathbf{F}$ обусловленность ухудшается.

Особенность возмущения $\Delta\boldsymbol{\psi}$ собственных векторов $\boldsymbol{\psi}$ для матрицы **F**, проявляется как ненулевая мнимая компонента и искажение вещественной части для всегда вещественных векторов $\boldsymbol{\psi}$. Для решения проблемы вычисления собственных векторов матрицы преобразования Фурье, предлагается: разделение матрицы (6) на вещественную и мнимую части, или, другими словами, разделение на четные и нечетные функции, образующие матрицу; формирование таких матриц (вещественной и мнимой частей), для которых все собственные значения будут различны.

В ходе исследований такие матрицы были определены:

$$\begin{cases} \mathbf{W} = \dfrac{1}{\sqrt{N}} \exp\left(-\dfrac{j\pi(2n - N)(2m - N + 1)}{2N}\right), \\ n, m = \overline{0, N-1}, \\ \begin{cases} \mathbf{A} = \mathrm{Re}(\mathbf{W}) \\ \mathbf{B} = \mathrm{Im}(\mathbf{W}) \end{cases}, \end{cases} \qquad (7)$$

где Re(…) и Im(…) — операторы взятия вещественной и мнимой частей.

Матрица **W** является не симметрической, не эрмитовой, нормальной и унитарной. Обратим внимание на отличие **W** по (7) от **F** по (6), в числителе степени экспоненты: отсутствует возмущающее слагаемое ε и на единицу отличается множитель $(2n - N)$, что приводит к фазовому изменению строковых гармонических компонент в матрице **W** по отношению к **F**. Фазовое смещение гармонических компонент в матрице **W**, и, соответственно, в матрицах **A** и **B**, позволяет сделать различными все собственные числа матриц **A** и **B** (рис. 2, *b*). По этой причине матрицы **A** и **B** хорошо обусловлены для решения задачи вычисления собственных векторов. Собственные числа матрицы **W** с машинной точностью принимают значения $|\lambda_v(\mathbf{W})| = 1$, но не всегда являются элементами множества $\{-1, -j, 1, j\}$ (рис. 2, *a*). При использовании матриц **A** и **B** собственные вектора делятся на два класса: четные для **A** и нечетные для **B**. Вместе с разделением собственных векторов по матрицам **A** и **B** происходит разделение собственных чисел, связанных уравнениями с собственными векторами. Потому возможно либо принять отдельную независимую нумерацию собственных чисел и векторов для **A** и **B**; либо придерживаться введен-

[1] 754-2019 — IEEE Standard for Floating-Point Arithmetic. Revision of IEEE Std 754. 2008.

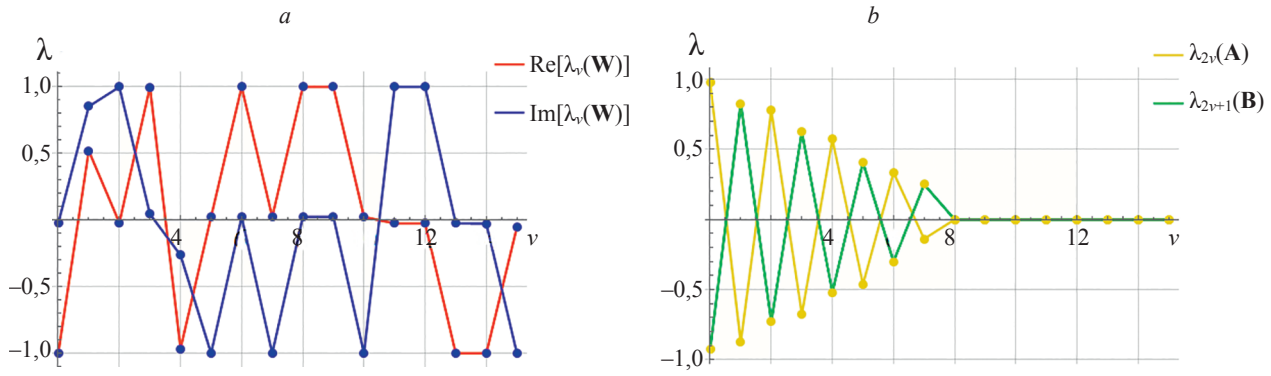


Рис. 2. Распределение собственных чисел для матриц размером 16 × 16: для действительной и мнимой частей матрицы **W** (*a*); для матриц **A** и **B** (*b*).

Значения в точках, соединительные линии отображены для удобства восприятия

Fig. 2. The distribution of eigenvalues for 16 × 16 matrices, values in points, connecting lines are displayed for ease of perception: for a matrix **W** (*a*); for matrices **A** and **B** (*b*)

ной ранее общей нумерации. Договоримся придерживаться общей нумерации, это позволит сохранить ранее принятые обозначения и согласованность изложения.

В качестве примера исследуем матрицы размером 16 × 16. Из рис. 2, *b* очевидна тенденция распределения собственных значений $\lambda_{2v}(\mathbf{A})$ и $\lambda_{2v+1}(\mathbf{B})$ при $v = \overline{0, N-1}$: в случае $v \le (N/2) - 1$ все собственные числа различны, как для каждой из матриц **A** или **B**, так и двух матриц. Различие собственных чисел для каждой матрицы обеспечивает хорошую обусловленность **A**, **B** при решении задачи определения собственных векторов. При $v > (N/2) - 1$ все собственные числа обращаются в нули. Общее число собственных чисел для матриц **A** и **B** отличных от нуля N, из чего следует, что общее число собственных векторов для **A** и **B** так же N.

Соответствующие ненулевым значениям собственные вектора обозначим $\psi_{\mathbf{A}}(t, 2v)$, $\psi_{\mathbf{B}}(t, 2v+1)$ для $v = \overline{0, N/2-1}$; причем матрица **A** в качестве собственных векторов имеет четные вейвлеты Эрмита–Гаусса $\psi_{\mathbf{A}}(t, 2v)$, а матрица **B** — нечетные $\psi_{\mathbf{B}}(t, 2v+1)$.

Дискретная форма вейвлетов Эрмита–Гаусса, интервал совпадения формы в частотном и временном пространствах

С точки зрения исследования свойств дискретных форм вейвлетов Эрмита–Гаусса значительным вопросом является их нормирование и определение интервалов задания. При поиске интервала можно руководствоваться различными соображениями, например, выбор интервала $[-a, a]$ можно осуществлять на основании энергетического критерия: $\left(\int_{-a}^{a} \psi^2(t, v)dt\right) \times \left(\int_{-\infty}^{\infty} \psi^2(t, v)dt\right)^{-1} = p$, где $p = 0 \ldots 1$ — показатель соотношения энергий вейвлетов заданных на интервалах $[-a, a]$ и $(-\infty, \infty)$; или критерия полного масштабного соответствия вейвлет-функций во временном пространстве $\psi(t, v)$ и их частотного образа $\mathcal{F}\{\psi(t, v)\}$ полученного в результате дискретного преобразования Фурье. Критерий масштабного соответствия является приоритетным, так как в отличие от энергетического не содержит некоторого произвола при выборе соотношения p. Выполненные исследования позволяют утверждать, что масштабный параметр $[-a, a]$ дискретной формы вейвлетов Эрмита–Гаусса зависит от числа отсчетов N, а норма зависит от числа отсчетов N и номера вейвлета v.

Для поиска выражения определения масштабного параметра $[-a, a]$ запишем уравнение:

$$\begin{cases} \boldsymbol{\psi} = \psi\left(\dfrac{2al}{(N-1)} - a, v\right), \; l = \overline{0, N-1}, \\ \overline{\boldsymbol{\psi}} = \dfrac{\boldsymbol{\psi}}{\|\boldsymbol{\psi}\|}, \\ \mathbf{F} = \left(\dfrac{1}{\sqrt{N}} \exp\left(-\dfrac{j\pi(2n-N+1)(2m-N+1)}{2N}\right)\right), \\ n, m = \overline{0, N-1}, \\ d_E(\overline{\boldsymbol{\psi}}, \mathrm{Re}(\mathbf{F}\overline{\boldsymbol{\psi}})) \to \min, \end{cases} \tag{8}$$

где $\overline{\boldsymbol{\psi}}$ — нормированный вейвлет Эрмита–Гаусса, т. е. собственный вектор; **F** — матрица преобразования Фурье (5) без возмущающей аддитивной компоненты ε; $d_E(\overline{\boldsymbol{\psi}}, \mathrm{Re}(\mathbf{F}\overline{\boldsymbol{\psi}}))$ — функция евклидового расстояния между $\overline{\boldsymbol{\psi}}$ и $\mathrm{Re}(\mathbf{F}\overline{\boldsymbol{\psi}})$.

Решая задачу (8) минимизации $d_E(\overline{\boldsymbol{\psi}}, \mathrm{Re}(\mathbf{F}\overline{\boldsymbol{\psi}}))$ и изменяя параметр a, будем производить поиск интервала $[-a, a]$, для различных значений N, т. е. получим последовательность $a = \alpha(N)$, причем значение a не зависит от номера вейвлета v.

На основании анализа последовательности $a = \alpha(N)$ был произведен подбор аппроксимирующего выражения:

$$a = \sqrt{\frac{8{,}00922}{4N - 2{,}69}} \sum_{m=1}^{N} \sqrt{\ln\left(\frac{N}{m}\right)} \pm \Delta a, \tag{9}$$

где Δa — ошибка аппроксимации. Среднее значение относительной ошибки при $N = \overline{3{,}2048}$ имеет порядок $\dfrac{\Delta a}{a} \approx 7 \cdot 10^{-5}$, что можно охарактеризовать как высокая

точность. Следует отметить, что для большинства практических расчетов границы интервала $[-a, a]$ можно определить с меньшей точностью, на основании выражения: $a = \sqrt{\frac{2}{N}} \sum_{m=1}^{N} \sqrt{\ln\left(\frac{N}{m}\right)} \pm \Delta a'$, где $\Delta a' > \Delta a$.

Далее произведем поиск нормирующего множителя дискретной формы вейвлет-функций. Исследования позволяют получить следующее выражение нормы:

$$\|\boldsymbol{\psi}\| = \left\| \left(\psi\left(\frac{2al}{(N-1)} - a, v \right) \right) \right\| = \sqrt{2^v v!} \sqrt[4]{\frac{N}{2}}, \quad l = \overline{0, N-1}. \tag{10}$$

Обобщая полученные результаты (8), (9) и (10) запишем выражения для дискретных форм семейства нормированных вейвлетов Эрмита–Гаусса:

$$\begin{cases} \psi(t, v) = \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) \sum_{k=0}^{v/2} \left((-1)^k \frac{v!}{k!(v-2k)!} (2t)^{v-2k} \right), \\ a = \sqrt{\frac{8{,}00922}{4N - 2{,}69}} \sum_{m=1}^{N} \sqrt{\ln\left(\frac{N}{m}\right)}, \ \|\boldsymbol{\psi}_v\| = \sqrt{2^v v!} \sqrt[4]{\frac{N}{2}}, \\ \overline{\boldsymbol{\psi}}_v = \frac{1}{\|\boldsymbol{\psi}_v\|} \left(\psi\left(-a + \frac{2al}{(N-1)}, v \right) \right), \ l, v = \overline{0, N-1}. \end{cases} \tag{11}$$

В качестве примера исследуем матрицу **M** размером 64 × 64, каждая строка которой образована вейвлетом $\overline{\boldsymbol{\psi}}_v$, $v = \overline{0, N-1}$. Обратим внимание на изображение (рис. 3) автокорреляционной матрицы $\mathbf{MM}^T$. Матрица **M** содержит все четные и нечетные вейвлеты, упорядоченные по номерам строк, так что первая строка матрицы **M** соответствует нулевому вейвлету. На рис. 3 видно, что на матрице $\mathbf{MM}^T$ для вейвлетов имеющих порядковый номер более 32 наблюдается «рябь», что говорит о потере ортогональности, так как скалярное произведение перестает быть равным нулю. Но при этом главная диагональ автокорреляционной матрицы $\mathbf{MM}^T$ остается доминирующей, что говорит о неравенстве нулю ее определителя и о том, что **M** образует базис. Дело в том, что в отличие от гармонических функций, для которых на каждой частоте есть вариант четной и нечетной, вейвлеты Эрмита–Гаусса при увеличении номера и переходе от четной функции к нечетной и опять с четной и т. д. постоянно увеличивают частоту. В результате при достижении номера вейвлета $(N/2) \le v$ нарушается условие обобщенной теоремы Котельникова, ортогональность по критерию скалярного произведения утрачивается, базис становится не ортогональным, но нормированным. Аналогичный вывод позволяет сделать исследование графика распределения собственных чисел (рис. 2, *b*), но на примере матрицы размером 16 × 16.

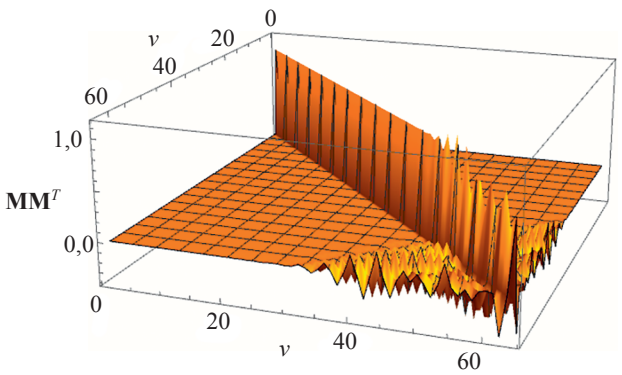


Рис. 3. Автокорреляционная матрица $\mathbf{MM}^T$ вейвлетов Эрмита–Гаусса

Fig. 3. The autocorrelation matrix $\mathbf{MM}^T$ of Hermite-Gauss wavelets

В результате можно сделать вывод, что дискретные формы вейвлетов Эрмита–Гаусса (11) позволяют задать ортонормированный базис подпространства $\mathbb{R}^{(N/2)} \in \mathbb{R}^N$, или нормированный базис пространства $\mathbb{R}^N$. Отметим, что такое свойство характерно для дискретных форм многих непрерывных гладких вейвлетов, если их задействовать для получения базиса в конечномерном пространстве. В связи с этим для оцифровки вейвлетов с номером v необходимо использовать частоту отсчетов на интервале дискретизации $[-a, a]$ более чем $2v$.

Таким образом, при декомпозиции по ортонормированному базису вейвлетов Эрмита–Гаусса (3) заданных в непрерывном виде в гильбертовом пространстве будет выполняться равенство Парсеваля:

$$\begin{cases} c_v = \int_{-\infty}^{\infty} \overline{\psi}(t, v) f(t) dt \\ \int_{-\infty}^{\infty} |f(t)|^2 dt = \sum_{v=0}^{\infty} |c_v|^2 \end{cases}.$$

При декомпозиции по базису вейвлетов заданных в пространстве $\mathbb{R}^N$ равенство Парсеваля будет выполняться только в случае если сигнал может быть разложен без остатка по базису $\overline{\boldsymbol{\psi}}_v$, $v = \overline{0, (N/2) - 1}$, т. е. в подпространстве $\mathbb{R}^{(N/2)} \in \mathbb{R}^N$, в противном случае равенство Парсеваля выполняться не будет.

Обсуждение

Среди неограниченного множества семейств ортогональных вейвлетов, вейвлеты Эрмита–Гаусса обладают уникальным свойством — они являются собственными векторами преобразования Фурье. Такая особенность определяет их хорошую локализацию как во временном, так и в частотном пространстве.

Вейвлеты Эрмита–Гаусса образуют базис, и потому могут быть использованы в задачах декомпозиции и синтеза сигналов. При выборе материнского вейвлета для декомпозиции и синтеза в первую очередь следует руководствоваться особенностями и свойствами образуемых им форм, для некоторых сигналов могут дать компактное разложение вейвлеты Морле или Добеши, для других вейвлеты Хара. В отдельных случаях для спектральной декомпозиции наиболее эффективны вейвлеты Эрмита–Гаусса.

Заключение

Произведены исследования собственных векторов преобразования Фурье. Получены формы матриц преобразования Фурье обеспечивающие хорошую обуслов-

ленность в решении задачи вычисления собственных векторов. Получены выражения вычисления масштабного параметра и нормирующего множителя для дискретных форм вейвлетов Эрмита–Гаусса. Выполненные исследования позволяют утверждать, что масштабный параметр дискретной формы вейвлетов Эрмита–Гаусса зависит от числа отсчетов, а норма зависит от числа отсчетов и номера вейвлета.

Литература

1. Коровкин Н.В., Грицутенко С.С. О применимости быстрого преобразования Фурье для гармонического анализа несинусоидальных токов и напряжений // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2017. № 2. С. 73–86.
2. Berber S. Theory of the design, and operation of digital filters // Discrete Communication Systems. 2021. P. 797–823. https://doi.org/10.1093/oso/9780198860792.003.0016
3. Уэлстид С. Фракталы и вейвлеты для сжатия изображений в действии. М.: Триумф, 2003. 320 с.
4. Rioul O., Vetterli M. Wavelets and signal processing // IEEE Signal Processing Magazine. 1991. V. 8. N 4. P. 14–38. https://doi.org/10.1109/79.91217
5. Chen C., Liu M.-Y., Tuzel O., Xiao J. R-CNN for small object detection // Lecture Notes in Computer Science. 2017. V. 10115. P. 214–230. https://doi.org/10.1007/978-3-319-54193-8_14
6. Дворников С.В., Сауков А.М. Метод распознавания радиосигналов на основе вейвлет-пакетов // Научное приборостроение. 2004. Т. 14. № 1. С. 85–93.
7. Подкур П.Н., Смоленцев Н.К. Вейвлет-пакетное разложение ЭЭГ на основные частотные ритмы // Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. 2016. № 2 (35). С. 54–61. https://doi.org/10.17223/19988605/35/6
8. Коробейников А.Г., Сидоркина И.Г. Первичная обработка данных о сейсмическом событии при помощи вейвлетов в MatLab // Кибернетика и программирование. 2018. № 1. С. 36–47. https://doi.org/10.25136/2306-4196.2018.1.25245
9. Кислинский В.С., Грахова Е.П., Абдрахманова Г.И. Применение вейвлетов и функций Эрмита для моделирования СШП-импульсов под требования маски ГКРЧ // Инфокоммуникационные технологии. 2015. Т. 13. № 4. С. 391–398. https://doi.org/10.18469/ikt.2015.13.4.05
10. Lindsey A.R. Wavelet packet modulation for orthogonally multiplexed communication // IEEE Transactions on Signal Processing. 1997. V. 45. P. 1336–1339. https://doi.org/10.1109/78.575704
11. Гришенцев А.Ю., Коробейников А.Г. Применение некоторых вейвлетов для генерации широкополосных сигналов // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2017. Т. 60. № 8. С. 712–720. https://doi.org/10.17586/0021-3454-2017-60-8-712-720
12. Гришенцев А.Ю., Коровкин Н.В., Коробейников А.Г. Исследование свойств преобразования Фурье вейвлетов Эрмита-Гаусса и применение полученных результатов в задачах радиоэлектроники // Журнал радиоэлектроники. 2025. № 6. С. 13. https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.6.11
13. Гришенцев А.Ю., Арустамов С.А., Коробейников А.Г., Козин О.В. Защита канала широкополосной связи с применением ортогональных шумоподобных сигнальных символов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2019. Т. 19. № 2. С. 280–291. https://doi.org/10.17586/2226-1494-2019-19-2-280-291
14. Новиков И.Я., Стечкин С.Б. Основы теории всплесков // Успехи математических наук. 1998. Т. 53. № 6 (324). С. 53–128. https://doi.org/10.4213/rm89
15. Дремин И.М., Иванов О.В., Нечитайло В.А. Вейвлеты и их использование // Успехи физических наук. 2001. Т. 171. С. 465–501. https://doi.org/10.3367/UFNr.0171.200105a.0465
16. Семенов В.И., Чумаров С.Г. От конструирования вейвлетов на основе производных функции Гаусса к синтезу фильтров с конечной импульсной характеристикой // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2024. Т. 24. № 2. С. 306–313. https://doi.org/10.17586/2226-1494-2024-24-2-306-313
17. Ландау Л.Д., Лившиц Е.М. Квантовая механика. Нерелятивистская теория. М.: Физматгиз, 1963. 704 с.

References

1. Korovkin N.V., Gritsutenko S.S. About applicability of the fast fourier transform for a harmonic analisys of non sinusoidal currents and voltages. *Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering*, 2017, no. 2, pp. 73–86. (in Russian)
2. Berber S. Theory of the design, and operation of digital filters. *Discrete Communication Systems*, 2021, pp. 797–823. https://doi.org/10.1093/oso/9780198860792.003.0016
3. Welstead S. *Fractal and Wavelet Image Compression Techniques*. SPIE Publication, 1999, 254 p.
4. Rioul O., Vetterli M. Wavelets and signal processing. *IEEE Signal Processing Magazine*, 1991, vol. 8, no. 4, pp. 14–38. https://doi.org/10.1109/79.91217
5. Chen C., Liu M.-Y., Tuzel O., Xiao J. R-CNN for small object detection. *Lecture Notes in Computer Science*, 2017, vol. 10115, pp. 214–230. https://doi.org/10.1007/978-3-319-54193-8_14
6. Dvornikov S.V., Saukov A.M. Signal identification method based on wavelet-packets. *Nauchnoe Priborostroenie*, 2004, vol. 14, no. 1, pp. 85–93. (in Russian)
7. Podkur P.N., Smolentsev N.K. Wavelet packet decomposition EEG on the basic frequency rhythms. *Tomsk State University Journal of Control and Computer Science*, 2016, no. 2 (35), pp. 54–61. (in Russian). https://doi.org/10.17223/19988605/35/6
8. Korobeinikov A.G., Sidorkina I.G. Primary processing of seismic event data using wavelets in MATLAB. *Cybernetics and Programming*, 2018, no. 1, pp. 36–47. (in Russian). https://doi.org/10.25136/2306-4196.2018.1.25245
9. Kislinski V.S., Grakhova E.P., Abdrakhmanova G.I. Application of wavelets and Hermiteans for simulation of ultra-wideband pulses satisfying to requirements of State Committee of Radio Frequencies. *Infokommunikacionnye Tehnologii*, 2015, vol. 13, no. 4, pp. 391–398. (in Russian). https://doi.org/10.18469/ikt.2015.13.4.05
10. Lindsey A.R. Wavelet packet modulation for orthogonally multiplexed communication. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1997, vol. 45, pp. 1336–1339. https://doi.org/10.1109/78.575704
11. Grishentsev A.Yu., Korobeinikov A.G. Application of several wavelets for generating wideband signals. *Journal of Instrument Engineering*, 2017, vol. 60, no. 8, pp. 712–720. (in Russian). https://doi.org/10.17586/0021-3454-2017-60-8-712-720
12. Grishentsev A.Yu., Korovkin N.V., Korobeynikov A.G. Investigation of the properties of the Fourier transform of Hermite-Gauss wavelets and application of the results obtained in radio electronics problems. *Journal of Radio Electronics*, 2025, no. 6, pp. 13. (in Russian). https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.6.11
13. Grishentsev A.Yu., Arustamov S.A., Korobeynikov A.G., Kozin O.V. Orthogonal noise-like signal symbols for broadband channel protection. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2019, vol. 19, no. 2, pp. 280–291. (in Russian). https://doi.org/10.17586/2226-1494-2019-19-2-280-291
14. Novikov I.Ya., Stechkin S.B. Basic wavelet theory. *Russian Mathematical Surveys*, 1998, vol. 53, no. 6, pp. 1159–1231. https://doi.org/10.1070/rm1998v053n06ABEH000089
15. Dremin I.M., Ivanov O.V., Nechitaĭlo V.A. Wavelets and their uses. *Physics Uspekhi*, 2001, vol. 44, no. 5, pp. 447–478. https://doi.org/10.1070/PU2001v044n05ABEH000918
16. Semenov V.I., Chumarov S.G. From the construction of wavelets based on derivatives of the Gaussian function to the synthesis of filters with a finite impulse response. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2024, vol. 24, no. 2, pp. 306–313. (in Russian). https://doi.org/10.17586/2226-1494-2024-24-2-306-313
17. Landau L.D., Lifshitz E.M. *Quantum Mechanics. Non-Relativistic Theory*. Moscow, Fizmatgiz Publ., 1963, 704 p. (in Russian)
18. Tokita S., Sugiyama T., Noguchi F., Fujii H., Kobayashi H. An attempt to construct an isosurface having symmetry elements. *Journal*

18. Tokita S., Sugiyama T., Noguchi F., Fujii H., Kobayashi H. An attempt to construct an isosurface having symmetry elements // Journal of Computer Chemistry, Japan. 2005. V. 5. N. 3. P. 159–164. https://doi.org/10.2477/jccj.5.159
19. Гришенцев А.Ю. Автокорреляционные и фрактальные свойства матриц линейного унитарного преобразования Фурье // Радиотехника. 2019. № 1. С. 5–14. https://doi.org/10.18127/j00338486-201901-01
20. Молчанов И.Н. Машинные методы решения прикладных задач. Алгебра, приближение функций. Киев: Наукова думка, 1987. 287 с.
21. Уилкинсон Дж. Х. Алгебраическая проблема собственных значений. М.: Наука, 1970. 564 с.

of Computer Chemistry, Japan, 2005, vol. 5, no. 3, pp. 159–164. https://doi.org/10.2477/jccj.5.159
19. Autocorrelation and fractal properties of the matrix linear unitary Fourier transforms. *Radioengineering*, 2019, no. 1, pp. 5–14. (in Russian). https://doi.org/10.18127/j00338486-201901-01
20. Molchanov I.N. *Machine Methods for Applied Problems Solving. Algebra, Approximation of Functions*. Kiev, Naukova dumka, 1987, 287 p. (in Russian)
21. Wilkinson J.H. *The Algebraic Eigenvalue Problem*. Oxford, Clarendon Press, 1965, 662 p.

Авторы

Гришенцев Алексей Юрьевич — доктор технических наук, доцент, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, SC 56321138400, https://orcid.org/0000-0003-1373-0670, AGrishentsev@yandex.ru
Коровкин Николай Владимирович — доктор технических наук, профессор, профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, 195251, Российская Федерация, SC 6601971248, https://orcid.org/0000-0002-1173-8727, Nikolay.Korovkin@gmail.com
Островский Данил Павлович — аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, https://orcid.org/0000-0001-5397-5475, dan97_@mail.ru

Authors

Alexey Yu. Grishentsev — D.Sc., Associate Professor, Associate Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, SC 56321138400, https://orcid.org/0000-0003-1373-0670, AGrishentsev@yandex.ru
Nikolay V. Korovkin — D.Sc., Full Professor, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, 195251, Russian Federation, SC 6601971248, https://orcid.org/0000-0002-1173-8727, Nikolay.Korovkin@gmail.com

Danil P. Ostrovskii — PhD Student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, https://orcid.org/0000-0001-5397-5475, dan97_@mail.ru

Статья поступила в редакцию 21.01.2025
Одобрена после рецензирования 01.07.2025
Принята к печати 18.07.2025

Received 21.01.2025
Approved after reviewing 01.07.2025
Accepted 18.07.2025

Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»