

ФОТОНИКА И ОПТОИНФОРМАТИКА PHOTONICS AND OPTOINFORMATICS

doi: 10.17586/2226-1494-2024-24-4-548-553

УДК 535.421

Изменение контраста изображения объекта наблюдения при однопиксельной и матричной визуализации через рассеивающую среду

Егор Николаевич Опарин¹✉, Анастасия Константиновна Лаппо-Данилевская²,
Алексей Викторович Черных³, Антон Николаевич Цыпкин⁴

^{1,2,3,4} Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

¹ en_oparin@itmo.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-4009-7594>

² ankonstLD@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1762-2688>

³ chernykh_a@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1297-3267>

⁴ tsyppkinan@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9254-1116>

Аннотация

Введение. Особенностью техники однопиксельной визуализации является возможность регистрации изображения на детекторе без пространственного разрешения, которое достигается путем подсвечивания объекта наблюдения пространственно-модулированными паттернами освещения. Данная техника применяется для получения изображений объектов, находящихся в затрудняющих видимость условиях, таких как дым или туман. Особенностью проведенных на данный момент исследований является доказательство работоспособности методов улучшения качества изображений, полученных методом однопиксельной визуализации, при выбранных условиях для рассеивающей среды без выявления границ применимости. Данная работа экспериментально демонстрирует влияние количества рассеивающих частиц в среде на контраст однопиксельных изображений. Кроме того, выполнено сравнение контраста изображений, полученных с помощью однопиксельной визуализации и матричного приемника, выполненного по технологии прибора с зарядовой связью (ПЗС-камеры). Это позволяет не только сравнить методы визуализации при изменяющихся условиях, но и оценить влияние потерь, вносимых рассеивающей средой, на контраст однопиксельных изображений. **Метод.** В работе использована экспериментальная схема однопиксельной визуализации, в которой однопиксельный детектор и фокусирующая линза заменены на ПЗС-камеру для получения сравнительных изображений. Между объектом и детектором помещалась кювета с раствором молока в воде различных объемных концентраций. Для каждой концентрации изображение объекта восстанавливалось методом однопиксельной визуализации и регистрировалось на ПЗС-камеру до достижения концентрации рассеивающего вещества, при котором ни один из методов не позволил получить изображение. Затем для каждого полученного изображения рассчитывался контраст. **Основные результаты.** Показано, что восстановленному методом однопиксельной визуализации изображению при концентрациях молока до 1/150 соответствует средний контраст 0,21, не снижающийся по мере роста рассеяния. При этом для ПЗС-камеры средний контраст в отсутствие рассеяния составляет 0,70, а с ростом концентрации молока монотонно снижается до 0,07. **Обсуждение.** Основной особенностью изображений, полученных методом однопиксельной визуализации сквозь рассеивающие среды, является сохранение среднего контраста при увеличении концентрации рассеивающего вещества. Полученный результат указывает на сохранение отношений между всеми зарегистрированными на одиночный детектор интенсивностями, используемыми при построении корреляционной функции. Однопиксельное изображение перестает восстанавливаться в случае, когда свет, провазимодействовавший с объектом из-за многократного рассеяния и поглощения водным раствором молока, не доходит до детектора. Рассмотренные особенности показывают перспективность использования однопиксельной визуализации для построения систем дистанционного зондирования с распознаванием образов объектов, так как позволяют получать схожие изображения при различных коэффициентах рассеяния рассеивающей среды.

Ключевые слова

однопиксельная визуализация, системы визуализации, дистанционное зондирование, рассеяние, обработка изображений, пространственный модулятор света

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки Российской Федерации в рамках государственного задания (паспорт № 2019-0903).

© Опарин Е.Н., Лаппо-Данилевская А.К., Черных А.В., Цыпкин А.Н., 2024

Ссылка для цитирования: Опарин Е.Н., Лаппо-Данилевская А.К., Черных А.В., Цыпкин А.Н. Изменение контраста изображения объекта наблюдения при однопиксельной и матричной визуализации через рассеивающую среду // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2024. Т. 24, № 4. С. 548–553. doi: 10.17586/2226-1494-2024-24-4-548-553

Contrast change of the test object image in single-pixel and focal-plane array imaging through a scattering medium

Egor N. Oparin¹✉, Anastasiia K. Lappo-Danilevskaia², Aleksey V. Chernykh³, Anton N. Tsyppkin⁴

^{1,2,3,4} ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

¹ en_oparin@itmo.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-4009-7594>

² ankonsLD@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1762-2688>

³ chernykh_a@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1297-3267>

⁴ tsypkinan@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9254-1116>

Abstract

In recent years, the single-pixel imaging technique which uses a detector without spatial resolution and spatially modulated illumination patterns to reconstruct an object image has been finding its application for imaging objects in visibility obstructing conditions such as smoke or fog. The unifying feature of the studies published so far is the proof of workability of the methods proposed by the authors to improve the quality of single-pixel imaging images at their chosen scattering medium parameters without revealing the limits of applicability. This work experimentally demonstrates the influence of the number of scattering particles in the medium on the contrast of single-pixel images, and also compares the results with images obtained with a CCD camera, which allows not only to compare imaging methods under varying conditions, but also to evaluate the influence of losses introduced by the presence of a scattering medium on the contrast of single-pixel images. This work uses the classical experimental scheme of single-pixel imaging in which the single-pixel detector and focusing lens were replaced by a CCD camera to obtain images for comparison. A cuvette containing milk solution of different concentrations was placed between the object and the detector. For each concentration, an image of the object was reconstructed using the single-pixel imaging method and then recorded on the CCD camera until the concentration of the scattering agent was reached at which no image could be obtained by either method. The contrast was then calculated for each image obtained. It is shown that the single-pixel imaging method for milk concentrations up to 1/150 has an average contrast of 0.21, which does not decrease as the scattering increases. At the same time for CCD camera the contrast in the absence of scattering is 0.70, and with increasing milk concentration monotonically decreases to 0.07. The main feature of images obtained by single-pixel imaging through scattering media is the preservation of contrast as the concentration of the scattering medium increases indicating that the relationships between all the recorded on a single-pixel detector intensities used in the construction of the correlation function are preserved. A single-pixel image ceases to be reconstructed only when information about the object does not reach the detector due to multiple scattering and absorption produced by a milk solution. The considered features show the prospect of using single-pixel imaging for the construction of remote sensing systems with pattern recognition, as they allow obtaining similar images at different scattering coefficients of the scattering medium.

Keywords

single-pixel imaging, imaging systems, remote sensing, scattering, image processing, spatial light modulator

Acknowledgements

The work was funded by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (Passport No. 2019-0903).

For citation: Oparin E.N., Lappo-Danilevskaia A.K., Chernykh A.V., Tsyppkin A.N. Contrast change of the test object image in single-pixel and focal-plane array imaging through a scattering medium. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2024, vol. 24, no. 4, pp. 548–553 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2024-24-4-548-553

Введение

Получение изображений в рассеивающих средах является важной задачей современных научных исследований и имеет широкие перспективы применения в таких областях как биомедицинская визуализация [1], подводная съемка [2] и навигация в условиях тумана [3]. Перспективным подходом для решения обозначенной задачи считается однопиксельная визуализация (ОВ). Главной особенностью ОВ в данном контексте является тот факт, что регистрация изображения происходит не на камеру (матрицу из детекторов), а на одиночный детектор [4]. При фокусировке излучения с одинаковыми параметрами (длина волны, интенсивность) на матрицу детекторов и одиночный детектор

равных площадей, интенсивность излучения на матрице распределяется по площадям множества пикселей. Это приводит к тому, что интенсивность света на каждом отдельном пикселе матрицы будет меньше, чем на одиночном детекторе, который получает всю интенсивность света на одну площадь. Благодаря этому для заданного порога шума системы при использовании ОВ достигается рост сигнала, несущего информацию об объекте наблюдения. Дополнительное превышение полезного сигнала над шумом может быть использовано для достижения таких преимуществ, как увеличение дальности системы визуализации, повышение ее чувствительности или для снижения оптической мощности, используемой для зондирования.

Разновидность ОВ, называемая фантомной, использующаяся в настоящей работе, требует освещения объекта наблюдения набором структурированных оптических полей, называемых паттернами освещения [5]. Последующее восстановление изображения основывается на расчете корреляционной функции между паттернами освещения и соответствующими им значениями интенсивности света, прошедшего через объект или отраженного им. Полученные оптические поля формируют путем модуляции лазерного излучения специальными диффузорами [6] или управляемыми пространственными модуляторами света [7].

При разработке систем дистанционного зондирования на основе ОВ в качестве доминирующего фактора, влияющего на качество изображения, в работе [8] рассмотрено динамическое изменение пропускания среды между объектом и приемником. Такая нестационарность приводит к флуктуациям регистрируемого сигнала, что делает корреляцию паттернов освещения и соответствующих им значений интенсивности невозможной. Вместе с тем возможное влияние значения такой характеристики среды как концентрация рассеивающих частиц на пространственную структуру паттернов игнорируется, что при рассмотрении систем биомедицинской визуализации напротив считается приоритетным [9]. Таким образом, остаются не выявленными границы применимости метода ОВ в зависимости от коэффициента рассеяния среды, за которой расположен объект.

Метод исследования

В настоящей работе экспериментально исследовано влияние рассеивающей среды с различной концентрацией рассеивающих частиц на качество изображений, получаемых при ОВ и визуализации с помощью матричного приемника, выполненного по технологии прибора с зарядовой связью (ПЗС-камеры). Выполнено сравнение контраста изображений, полученных с помощью ОВ и ПЗС-камеры при изменении объемной концентрации молока в водном растворе.

Восстановление изображения методом ОВ происходит путем расчета корреляционной функции между различными паттернами освещения, взаимодействующими с объектом, и соответствующими им значениями интенсивности на однопиксельном детекторе. Наиболее широко распространенным набором паттернов являются паттерны освещения, формируемые из одноименной матрицы. Поскольку ее элементы принимают значения -1 и 1 , а пространственный модулятор света способен отобразить значения в диапазоне $(0, 1)$, то для получения изображения использован разностный метод, описанный в работе [10]. В результате использования данного метода получено улучшение качества восстановленного изображения за счет вычитания коррелированных шумов и удвоение числа паттернов, необходимых для полного восстановления однопиксельного изображения. Для полученных в настоящей работе изображений с разрешением 64×64 пикселей число паттернов составляет $4096 \times 2 = 8192$. Особенность паттернов освещения — их ортогональность, что по-

зволяет производить восстановление изображения по формуле вида:

$$GI(x, y) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N h_i (B_{i+} - B_{i-}),$$

где $GI(x, y)$ — пространственное распределение интенсивности света (изображения); $h_i(x, y)$ — сумма паттернов освещения с весовыми коэффициентами; B_{i+} и B_{i-} — интенсивности на однопиксельном детекторе, соответствующие освещению объекта положительной h_i и отрицательной $h_i = h_{i+} - h_{i-}$ частями.

Для экспериментального восстановления однопиксельных изображений сконструирована стандартная установка [7], схема которой приведена на рис. 1.

Излучение непрерывного лазера с длиной волны 532 нм освещает пространственный модулятор света на основе цифрового микрозеркального устройства (DLP 6500 0.65, Texas Instruments, США), где оно модулируется паттерном освещения h_{i+} . Отраженное от пространственного модулятора излучение фокусируется на однопиксельный фотодиодный детектор (BPW34, Vishay Intertechnology, США), установленный после собирающей линзы, обеспечивающей сбор всего приходящего лазерного света в пределах активной области фотодетектора. Полученное значение соответствует B_{i+} . Между цифровым микрозеркальным устройством и детектором на оптическом пути установлена кювета толщиной 10 мм с водным раствором молока жирностью 3,2 %. Объемная доля молока изменялась в ходе эксперимента. Далее после кюветы расположен объект наблюдения, представленный вырезанной в непрозрачном пластике сквозной полостью в виде буквы τ размером 8×6 мм.

Для сравнения ОВ с классическими методами собирающая линза и детектор заменялись ПЗС-камерой (MV-UB130GM, MindVision, Китай). Экспериментально получено два набора изображений при различной концентрации молока в воде (рис. 2). Один набор включал однопиксельные изображения, другой — полученные с помощью ПЗС-камеры.

Рассеивающие частицы молока имеют размер больший, чем длина волны (λ) падающего излучения, в

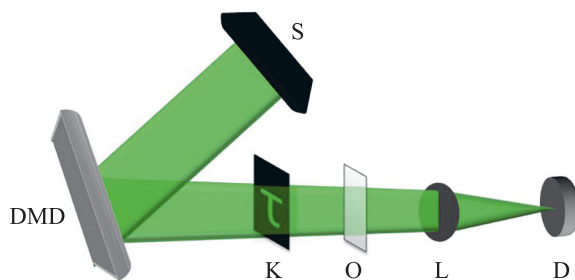


Рис. 1. Экспериментальная схема реализации метода однопиксельной визуализации: S — источник излучения; O — объект; DMD — цифровое микрозеркальное устройство; K — кювета с рассеивающей средой; L — линза; D — однопиксельный детектор

Fig. 1. Experimental scheme for implementing the single-pixel imaging method. Here S — light source, O — object, DMD — digital micromirror device, K — cuvette with scattering medium, L — lens, D — single-pixel detector

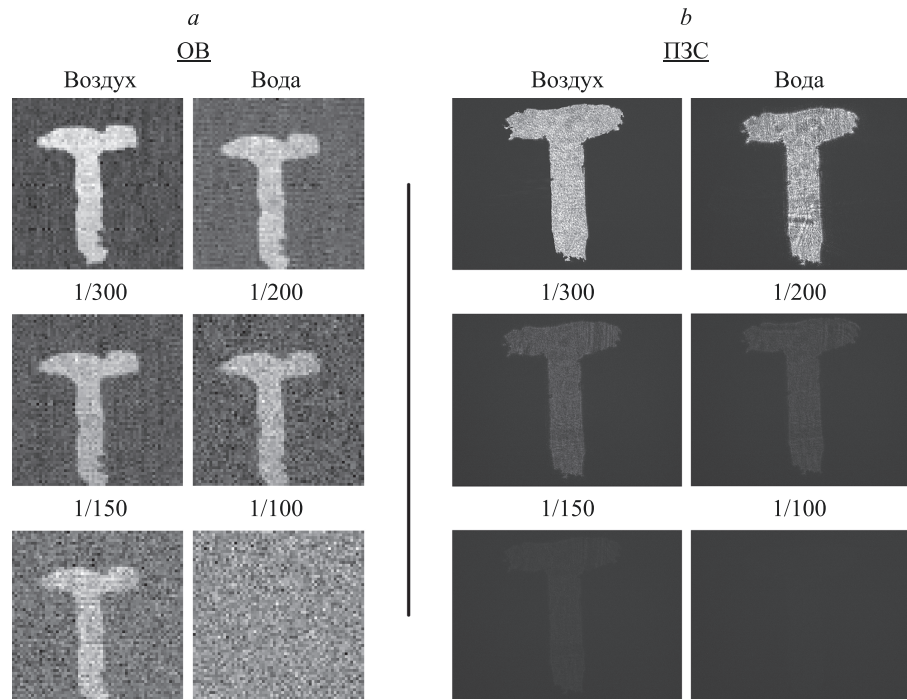


Рис. 2. Однопиксельная визуализация (а) и ПЗС-изображения (b) тестового объекта размерами 10×10 мм, полученные через среду с различным рассеянием, воздействие которого регулируется концентрацией молока в воде. Запись концентраций произведена в соотношении $V(\text{молока})/V(\text{воды})$

Fig. 2. Single-pixel (OB) and conventional (ПЗС) images of a test object obtained through a medium with different scattering, the contribution of which was controlled by the concentration of milk in water. Milk concentration is given as $V(\text{milk})/V(\text{water})$

связи с чем для их описания использована теория рассеяния Ми, представляющая частицу в виде идеальной жесткой сферы. Диаметр рассеивающих частиц (d) молока составляет от десятых до десятков микрометров [11]. Величиной, характеризующей способность тела рассеивать падающее на него излучение, является коэффициент рассеяния. Для описания среды, содержащей множество рассеивающих частиц, использован коэффициент рассеяния μ_s , рассчитанный по формуле:

$$\mu_s(d, \lambda) = NV^{-1}\sigma_s,$$

где V — объем среды; N — число частиц; σ_s — эффективное сечение рассеяния частицы [12].

Коэффициент рассеяния напрямую зависит от концентрации рассеивающих частиц, выражающейся как отношение числа частиц N к объему V . При его увеличении число фотонов, провзаимодействовавших с объектом и дошедших до детектора, уменьшается. В результате данного взаимодействия значение μ_s может быть увеличено за счет увеличения концентрации молока в водном растворе. Аналогичный алгоритм описан в работе [13]. При этом потери происходят не только из-за рассеяния, но также и из-за поглощения средой: коэффициент поглощения молока на используемой длине волны превышает коэффициент поглощения воды [11].

Экспериментальные результаты

На рис. 2 приведены экспериментальные результаты исследования предельной концентрации молока, при которой изображение объекта различимо для ме-

тодов ОБ и ПЗС-камеры и равно отношению 1/150. Следовательно, излучения, провзаимодействовавшего с объектом и дошедшего сквозь рассеивающую среду до детектора, достаточно для восстановления изображения. По изображениям, полученным с помощью ПЗС-камеры, прослеживается ухудшение различимости объектов от фона. Отметим, что контур объектов, полученных с помощью обоих методов восстановления изображений, остается четким, а искажение пространственного распределения освещения рассеивающей средой может привести к размытию границ [14]. Значит, в рассматриваемой конфигурации экспериментальной установки, симулирующей устройство для дистанционного зондирования объектов сквозь рассеивающую среду, однопиксельным детектором и ПЗС-камерой вклад рассеивающей среды можно свести к уменьшению интенсивности излучения, провзаимодействовавшего с объектом и дошедшего сквозь рассеивающую среду до детектора, а не к нарушению его пространственного распределения.

Важной для распознавания объектов наблюдения характеристикой системы дистанционного зондирования является контраст получаемых изображений. Данный параметр описывает разницу яркости различных участков изображения (как правило — область изображения объекта и фона) и вычисляется при помощи выражения:

$$\gamma = \frac{B_{\max} - B_{\min}}{B_{\max} + B_{\min}},$$

где $B_{\max}$ и $B_{\min}$ — максимальная и минимальная яркости рассматриваемого изображения.

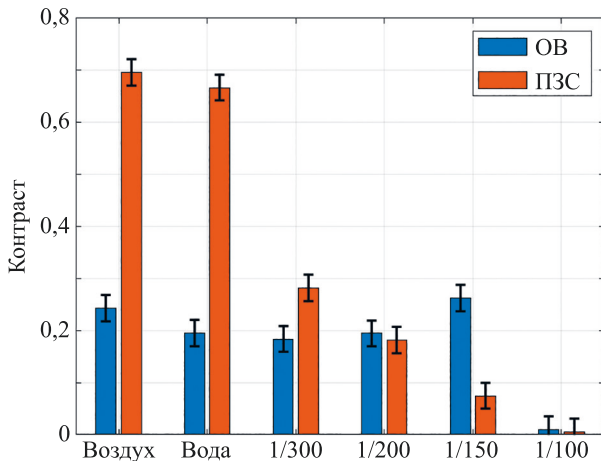


Рис. 3. Контраст изображений, полученных при однопиксельной (ОВ) и матричной (ПЗС) визуализации через раствор молока в воде. Концентрация молока записана в соотношении $V(\text{молока})/V(\text{воды})$

Fig. 3. Contrast of images obtained by single-pixel (blue bars) and conventional (red bars) imaging through a solution of milk in water. Milk concentration is given as $V(\text{milk})/V(\text{water})$

Погрешность рассчитанных значений составляет 0,02 для однопиксельного детектора и 0,01 для матричного. Величина погрешности обуславливается внутренними шумами детекторов и источника. При визуализации через воздух или чистую воду влияние рассеяния отсутствует или мало. Из рис. 3 видно, что контраст изображения с ПЗС-камеры выше, чем для ОВ: 0,69 и 0,67 для воздуха и воды против 0,24 и 0,20 соответственно. По мере увеличения концентрации молока коэффициент рассеяния растет, следовательно,

но, увеличивается и воздействие рассеяния. При этом растет и величина поглощения, из-за чего наблюдается резкий спад контраста классических изображений до 0,07 при сохранении данного параметра для однопиксельных в районе 0,21. Это происходит из-за того, что в отличие от ПЗС-камеры, где контраст изображения зависит от интенсивности сигнала, дошедшего от объекта до детектора, качество построения корреляционной функции в методе ОВ зависит от сохранения относительных величин всех зарегистрированных на одиночный детектор интенсивностей. При этом в обоих случаях при сильном ослаблении сигнала, соответствующем концентрации молока 1/100, изображение объекта не восстанавливается.

Заключение

В работе экспериментально продемонстрировано влияние концентрации рассеивающего вещества в водном растворе на контраст изображений, полученных при однопиксельной и матричной визуализации. Для однопиксельного метода визуализации характерен меньший контраст изображений в прозрачных средах, сохраняющийся по мере увеличения концентрации рассеивающих частиц в среде. У полученных с помощью прибора с зарядовой связью (ПЗС-камеры) изображений контраст в прозрачных средах выше, чем при использовании метода однопиксельной визуализации. Отметим, что с ростом концентрации молока в воде контраст снижается в 10 раз относительно визуализации через воздух или в 9,5 раза относительно чистой воды, становясь ниже, чем при однопиксельной визуализации.

Литература

1. Paniagua-Diaz A.M., Starshynov I., Fayard N., Goetschy A., Pierrat R., Carminati R., Bertolotti J. Blind ghost imaging // *Optica*. 2019. V. 6. N 4. P. 460–464. <https://doi.org/10.1364/optica.6.000460>
2. Le M., Wang G., Zheng H., Liu J., Zhou Y., Xu Z. Underwater computational ghost imaging // *Optics Express*. 2017. V. 25. N 19. P. 22859–22868. <https://doi.org/10.1364/oe.25.022859>
3. Zhang Y., Li S., Sun J., Zhang X., Liu D., Zhou X., Li H., Hou Y. Three-dimensional single-photon imaging through realistic fog in an outdoor environment during the day // *Optics Express*. 2022. V. 30. N 19. P. 34497–34509. <https://doi.org/10.1364/oe.464297>
4. Gatti A., Bache M., Magatti D., Brambilla E., Ferri F., Lugiato L.A. Coherent imaging with pseudo-thermal incoherent light // *Journal of Modern Optics*. 2006. V. 53. N 5-6. P. 739–760. <https://doi.org/10.1080/09500340500147240>
5. Shapiro J.H., Boyd R.W. The physics of ghost imaging // *Quantum Information Processing*. 2012. V. 11. N 4. P. 949–993. <https://doi.org/10.1007/s11128-011-0356-5>
6. Gatti A., Brambilla E., Caspani L., Jedrkiewicz O., Lugiato L.A. Quantum imaging and spatio-temporal correlations // *Optics and Spectroscopy*. 2011. V. 111. N 4. P. 505–509. <https://doi.org/10.1134/s0030400x11110087>
7. Bromberg Y., Katz O., Silberberg Y. Ghost imaging with a single detector // *Physical Review A*. 2009. V. 79. N 5. P. 053840. <https://doi.org/10.1103/physreva.79.053840>
8. Bashkansky M., Park S.D., Reintjes J. Single pixel structured imaging through fog // *Applied Optics*. 2021. V. 60. N 16. P. 4793–4797. <https://doi.org/10.1364/ao.425281>
9. Huyan D., Lagrosas N., Shiina T. Target imaging in scattering media using ghost imaging optical coherence tomography // *APL Photonics*. 2022. V. 7. N 8. P. 086104. <https://doi.org/10.1063/5.0099638>

References

1. Paniagua-Diaz A.M., Starshynov I., Fayard N., Goetschy A., Pierrat R., Carminati R., Bertolotti J. Blind ghost imaging. *Optica*, 2019, vol. 6, no. 4, pp. 460–464. <https://doi.org/10.1364/optica.6.000460>
2. Le M., Wang G., Zheng H., Liu J., Zhou Y., Xu Z. Underwater computational ghost imaging. *Optics Express*, 2017, vol. 25, no. 19, pp. 22859–22868. <https://doi.org/10.1364/oe.25.022859>
3. Zhang Y., Li S., Sun J., Zhang X., Liu D., Zhou X., Li H., Hou Y. Three-dimensional single-photon imaging through realistic fog in an outdoor environment during the day. *Optics Express*, 2022, vol. 30, no. 19, pp. 34497–34509. <https://doi.org/10.1364/oe.464297>
4. Gatti A., Bache M., Magatti D., Brambilla E., Ferri F., Lugiato L.A. Coherent imaging with pseudo-thermal incoherent light. *Journal of Modern Optics*, 2006, vol. 53, no. 5-6, pp. 739–760. <https://doi.org/10.1080/09500340500147240>
5. Shapiro J.H., Boyd R.W. The physics of ghost imaging. *Quantum Information Processing*, 2012, vol. 11, no. 4, pp. 949–993. <https://doi.org/10.1007/s11128-011-0356-5>
6. Gatti A., Brambilla E., Caspani L., Jedrkiewicz O., Lugiato L.A. Quantum imaging and spatio-temporal correlations. *Optics and Spectroscopy*, 2011, vol. 111, no. 4, pp. 505–509. <https://doi.org/10.1134/s0030400x11110087>
7. Bromberg Y., Katz O., Silberberg Y. Ghost imaging with a single detector. *Physical Review A*, 2009, vol. 79, no. 5, pp. 053840. <https://doi.org/10.1103/physreva.79.053840>
8. Bashkansky M., Park S.D., Reintjes J. Single pixel structured imaging through fog. *Applied Optics*, 2021, vol. 60, no. 16, pp. 4793–4797. <https://doi.org/10.1364/ao.425281>
9. Huyan D., Lagrosas N., Shiina T. Target imaging in scattering media using ghost imaging optical coherence tomography. *APL Photonics*, 2022, vol. 7, no. 8, pp. 086104. <https://doi.org/10.1063/5.0099638>

10. Yu Z., Wang X.-Q., Gao C., Li Z., Zhao H., Yao Z. Differential Hadamard ghost imaging via single-round detection // *Optics Express*. 2021. V. 29. N 25. P. 41457–41466. <https://doi.org/10.1364/oe.441501>
11. Stocker S., Foschum F., Krauter P., Bergmann F., Hohmann A., Happ C.S., Kienle A. Broadband optical properties of milk // *Applied Spectroscopy*. 2017. V. 71. N 5. P. 951–962. <https://doi.org/10.1177/0003702816666289>
12. Dahm D.J. Explaining some light scattering properties of milk using representative layer theory // *Journal of Near Infrared Spectroscopy*. 2013. V. 21. N 5. P. 323–339. <https://doi.org/10.1255/jnirs.1071>
13. Yu Z., Zhang L., Yuan S., Bai X., Wang Y., Chen X., Sun M., Li X., Liu Y., Zhou X. Color ghost imaging through a dynamic scattering medium based on deep learning // *Optical Engineering*. 2023. V. 62. N 2. P. 021005. <https://doi.org/10.1117/1.oe.62.2.021005>
14. Wang D., Sahoo S.K., Zhu X., Adamo G., Dang C. Non-invasive super-resolution imaging through dynamic scattering media // *Nature Communications*. 2021. V. 12. N 1. P. 3150. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-23421-4>
10. Yu Z., Wang X.-Q., Gao C., Li Z., Zhao H., Yao Z. Differential Hadamard ghost imaging via single-round detection. *Optics Express*, 2021, vol. 29, no. 25, pp. 41457–41466. <https://doi.org/10.1364/oe.441501>
11. Stocker S., Foschum F., Krauter P., Bergmann F., Hohmann A., Happ C.S., Kienle A. Broadband optical properties of milk. *Applied Spectroscopy*, 2017, vol. 71, no. 5, pp. 951–962. <https://doi.org/10.1177/0003702816666289>
12. Dahm D.J. Explaining some light scattering properties of milk using representative layer theory. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 2013, vol. 21, no. 5, pp. 323–339. <https://doi.org/10.1255/jnirs.1071>
13. Yu Z., Zhang L., Yuan S., Bai X., Wang Y., Chen X., Sun M., Li X., Liu Y., Zhou X. Color ghost imaging through a dynamic scattering medium based on deep learning. *Optical Engineering*, 2023, vol. 62, no. 2, pp. 021005. <https://doi.org/10.1117/1.oe.62.2.021005>
14. Wang D., Sahoo S.K., Zhu X., Adamo G., Dang C. Non-invasive super-resolution imaging through dynamic scattering media. *Nature Communications*, 2021, vol. 12, no. 1, pp. 3150. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-23421-4>

Авторы

Опарин Егор Николаевич — младший научный сотрудник, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 57209803630](https://orcid.org/0000-0002-4009-7594), <https://orcid.org/0000-0002-4009-7594>, en_oparin@itmo.ru

Лаппо-Данилевская Анастасия Константиновна — инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 57851031300](https://orcid.org/0000-0002-1762-2688), <https://orcid.org/0000-0002-1762-2688>, ankonstLD@itmo.ru

Черных Алексей Викторович — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 56034206000](https://orcid.org/0000-0003-1297-3267), <https://orcid.org/0000-0003-1297-3267>, chernykh_a@itmo.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), <https://orcid.org/0000-0002-9254-1116>, tsyppkinan@itmo.ru

Authors

Egor N. Oparin — Junior Researcher, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 57209803630](https://orcid.org/0000-0002-4009-7594), <https://orcid.org/0000-0002-4009-7594>, en_oparin@itmo.ru

Anastasiia K. Lappo-Danilevskaia — Engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 57851031300](https://orcid.org/0000-0002-1762-2688), <https://orcid.org/0000-0002-1762-2688>, ankonstLD@itmo.ru

Aleksey V. Chernykh — PhD (Physics & Mathematics), ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 56034206000](https://orcid.org/0000-0003-1297-3267), <https://orcid.org/0000-0003-1297-3267>, chernykh_a@itmo.ru

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

Статья поступила в редакцию 16.05.2024
Одобрена после рецензирования 04.07.2024
Принята к печати 23.07.2024

Received 16.05.2024
Approved after reviewing 04.07.2024
Accepted 23.07.2024



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»