

DOI: 10.17586/1023-5086-2024-91-05-25-32

УДК 535-45

Фантомная поляриметрия с пространственным модулятором оптического излучения для формирования структурированных полей

Владимир Сергеевич Шумигай¹✉, Полина Евгеньевна Морева²,
Борис Александрович Наседкин³, Азат Олфатович Исмагилов⁴,
Алексей Викторович Черных⁵, Андрей Алексеевич Гайдаш⁶,
Антон Владимирович Козубов⁷, Алексей Дониславович Киселев⁸,
Антон Николаевич Цыпкин⁹

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

¹vshumigay@itmo.ru

<https://orcid.org/0000-0001-8597-1196>

²morepolinamore@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0008-5771-2419>

³banasedkin@itmo.ru

<https://orcid.org/0000-0002-4507-8616>

⁴ismagilov.azat@itmo.ru

<https://orcid.org/0000-0002-5844-2966>

⁵chernykh_a@itmo.ru

<https://orcid.org/0000-0003-1297-3267>

⁶andrei_gaidash@itmo.ru

<https://orcid.org/0000-0001-9870-9285>

⁷avkozubov@itmo.ru

<https://orcid.org/0000-0002-4468-5406>

⁸adkiselev@itmo.ru

<https://orcid.org/0000-0002-1023-3284>

⁹tsyppkinan@itmo.ru

<https://orcid.org/0000-0002-9254-1116>

Аннотация

Предмет исследования. Пространственное распределение поляризационных свойств объектов с линейным дихроизмом. **Цель.** Создание схемы фантомной поляриметрии с пространственным модулятором оптического излучения для контроля оптических полей, освещающих объект с линейным дихроизмом. **Метод.** Измерение методом фантомной поляриметрии интегральной интенсивности излучения, прошедшего через объект. Численный расчет корреляционных функций интенсивностей двух наборов оптических полей с ортогональными поляризациями для дальнейшего расчета модуля азимута анизотропии объекта с линейным дихроизмом. **Основные результаты.** Разработана установка фантомной поляриметрии с использованием пространственного модулятора оптического излучения для контроля характеристик структурированных оптических полей. Получены картины поляризационных свойств трех объектов с линейным дихроизмом. **Практическая значимость.** Фантомная поляриметрия имеет ряд преимуществ относительно традиционных методов получения поляризационных картин при исследовании объектов в условиях низкой интенсивности излучения, повышенной турбулентности среды, а также в спектральных диапазонах, в которых традиционные приборы измерения дорогостоящи или недоступны. Введение в схему фантомной поляриметрии пространственного модулятора оптического излучения позволяет отказаться от необходимости регистрации генерируемых полей. Данная модификация позволит варьировать характеристики оптических полей под конкретные объекты в микробиологических и медицинских исследованиях.

Ключевые слова: фантомная поляриметрия, структурированное оптическое поле, азимут анизотропии, линейный дихроизм

Благодарность: работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания (Паспорт № 2019-0903).

Ссылка для цитирования: Шумигай В.С., Морева П.Е., Наседкин Б.А., Исмагилов А.О., Черных А.В., Гайдаш А.А., Козубов А.В., Киселев А.Д., Цыпкин А.Н. Фантомная поляриметрия с пространственным модулятором оптического излучения для формирования структурированных полей // Оптический журнал. 2024. Т. 91. № 5. С. 25–32. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-05-25-32>

Коды OCIS: 110.5405, 110.3010, 110.1758

Ghost polarimetry with a spatial light modulator for creation of structured illumination patterns

VLADIMIR S. SHUMIGAI¹✉, POLINA E. MOREVA², BORIS A. NASEDKIN³, AZAT O. ISMAGILOV⁴, ALEKSEY V. CHERNYKH⁵, ANDREI A. GAIDASH⁶, ANTON V. KOZUBOV⁷, ALEXEI D. KISELEV⁸, ANTON N. TSYPKIN⁹

ITMO University, St. Petersburg, Russia

¹ vshumigay@itmo.ru	https://orcid.org/0000-0001-8597-1196
² morepolinamore@gmail.com	https://orcid.org/0009-0008-5771-2419
³ banasedkin@itmo.ru	https://orcid.org/0000-0002-4507-8616
⁴ ismagilov.azat@itmo.ru	https://orcid.org/0000-0002-5844-2966
⁵ chernykh_a@itmo.ru	https://orcid.org/0000-0003-1297-3267
⁶ andrei_gaidash@itmo.ru	https://orcid.org/0000-0001-9870-9285
⁷ avkozubov@itmo.ru	https://orcid.org/0000-0002-4468-5406
⁸ adkiselev@itmo.ru	https://orcid.org/0000-0002-1023-3284
⁹ tsyppkinan@itmo.ru	https://orcid.org/0000-0002-9254-1116

Abstract

Subject of study. Spatial distribution of polarization properties of objects with linear dichroism. **Aim of study.** Creation of a ghost polarimetry scheme with a spatial light modulator to control the optical fields illuminating an object with linear dichroism. **Method.** Measurement by ghost polarimetry of the integral intensity of radiation passing through an object. Numerical calculation of intensity correlation functions for two sets of optical fields with orthogonal polarizations for further calculation of the azimuth of anisotropy modulus of an object with linear dichroism. **Main results.** A ghost polarimetry setup using a spatial light modulator was developed to monitor the characteristics of structured optical fields. Pictures of the polarization properties of three objects with linear dichroism were obtained. **Practical significance.** Ghost polarimetry has a lot of advantages over traditional methods of obtaining polarization patterns when studying objects under conditions of low radiation intensity, increased turbulence of the environment, as well as in spectral ranges for which traditional measuring instruments are expensive or unavailable. The introduction of a spatial light modulator into the ghost polarimetry scheme makes it possible to eliminate the need to register the generated fields. This modification will allow to vary the characteristics of optical fields for specific objects in microbiological and medical research.

Keywords: ghost polarimetry, structured optical field, azimuth of anisotropy, linear dichroism

Acknowledgment: this work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (2019-0903).

For citation: Shumigai V.S., Moreva P.E., Nasedkin B.A., Ismagilov A.O., Chernykh A.V., Gaidash A.A., Kozubov A.V., Kiselev A.D., Tsyppkin A.N. Ghost polarimetry with a spatial light modulator for creation of structured illumination patterns [in Russian] // Opticheskiy Zhurnal. 2024. V. 91. № 5. P. 25–32. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-05-25-32>

OCIS codes: 110.5405, 110.3010, 110.1758

ВВЕДЕНИЕ

Методы фантомной метрологии активно применяются в системах дистанционного зондирования [1, 2], в микробиологических и медицинских исследованиях [3, 4], а также в помехоустойчивых системах передачи данных [5]. Идеи, заложенные в основу фантомных измерений, были успешно реализованы в решении ряда прикладных задач. Так, например, для определения поляризационных свойств объектов ранее была предложена методика фантомной поляриметрии (ФП) [6, 7].

Мотивация в разработке устройств ФП обусловлена преимуществами фантомных измерений, такими как возможность работы в условиях низкой интенсивности излучения [8, 9], повышенной турбулентности среды [10, 11], а также в спектральных диапазонах, для которых традиционные приборы измерения (камеры ПЗС¹) дорогостоящи или недоступны [12–14]. На сегодняшний день можно сказать, что у ФП есть большой потенциал развития в медицинских исследованиях. Известно, что последние несколько лет активно исследуется связь поляризационных свойств биологических тканей с их морфологическими и функциональными свойствами [15]. В частности, традиционные методы поляриметрии давно используются для выявления глаукомы на ранних стадиях [16]. Однако биологическая ткань зачастую представляет собой турбулентную среду, что снижает точность поляриметрических исследований [17, 18]. При этом в работе [17] отмечается, что улучшение качества получаемых поляризационных картин методами традиционной поляриметрии в турбулентных средах требует усложнения как оптической, так и вычислительной системы. Однако ввиду того, что системы фантомной метрологии обладают большей чувствительностью при работе в рассеивающих средах, в том числе и в биологических тканях [19], относительно классических систем [10, 11], то справедливо выдвинуть предположение, что ФП потенциально может стать простым и недорогим решением для получения поляризационных картин объектов в турбулентных средах.

В существующих системах ФП псевдотепловое неполяризованное излучение, сгенери-

рованное парой диффузоров, разделяется на опорное и объектное плечи. При этом в опорном плече последовательно расположены поляризатор и камера, а в объектном плече последовательно установлены объект и однопиксельный интегрирующий приемник. Таким образом, в рамках одного измерения на камеру регистрируется спекл-структура с определенной поляризацией, а на однопиксельный приемник излучения — значение интегральной интенсивности, прошедшей через объект. При повороте пары диффузоров происходит генерация нового оптического поля, которое не зависит от предыдущей спекл-структуры. Данный алгоритм повторяется заданное количество раз со сменой спекл-структур, после чего ось поляризации поляризатора в опорном плече поворачивается на 90° и измерения проводятся еще раз. Для объектов с линейным дихроизмом достаточно провести две серии экспериментов, чтобы обладать набором данных, необходимым для расчета двух корреляционных функций на ортогональных поляризациях. Сравнение данных функций позволяет оценить численные значения модуля азимута анизотропии и ее характеристики [7].

Как следует из описания выше, в существующих системах ФП отсутствует возможность задания определенных характеристик используемых оптических полей, измерение которых осуществляется пространственно-протяженным приемником. В результате становится невозможным использовать структурированные оптические поля, такие как случайные бинарные паттерны, базисы Адамара или Фурье, применение которых ведет к повышению качества восстанавливаемого изображения при одинаковом количестве измерений [20]. Для решения аналогичной проблемы в фантомной визуализации ранее была предложена модификация методики — вычислительная фантомная визуализация [21], где плечо с камерой было заменено на пространственный модулятор оптического излучения (ПМОИ). Технической реализации соответствующего перехода в ФП ранее не существовало. В соответствии с этим в настоящей работе предлагается модификация системы классической ФП, основная особенность которой заключается в использовании ПМОИ для модуляции лазерного излучения и создания в плоскости объекта заданных структурированных оптических полей.

¹ Прибор с зарядовой связью.

Целью работы является создание схемы ФП с использованием ПМОИ для контроля оптических полей, освещающих объект с линейным дихроизмом.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ КАРТИН МЕТОДОМ ФАНТОМНОЙ ПОЛЯРИМЕТРИИ

В данной работе определение поляризационных свойств объектов с линейным дихроизмом происходит за счет корреляционных функций интенсивностей второго порядка $G(\mathbf{r})$, вычисленных для двух наборов оптических полей с горизонтальной (угол α равен 0°) и вертикальной (угол α равен 90°) поляризациями

$$G^\alpha = \langle BI^\alpha(\mathbf{r}) \rangle - \langle B \rangle \langle I^\alpha(\mathbf{r}) \rangle, \quad (1)$$

$$M(\mathbf{r}) = \begin{pmatrix} \cos^2 \theta(\mathbf{r}) + P(\mathbf{r}) \sin^2 \theta(\mathbf{r}) & (1 - P(\mathbf{r}))(\sin 2\theta(\mathbf{r})) / 2 \\ (1 - P(\mathbf{r}))(\sin 2\theta(\mathbf{r})) / 2 & \sin^2 \theta(\mathbf{r}) + P(\mathbf{r}) \cos^2 \theta(\mathbf{r}) \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где $\theta(\mathbf{r})$ — азимут анизотропии, $P(\mathbf{r})$ — характеристика анизотропии, которая показывает относительное поглощение двух ортогональных поляризационных компонент излучения.

На основе рассчитанных корреляционных функций для двух наборов оптических полей с горизонтальной и вертикальной поляризациями вычисляется модуль азимута анизотропии для объектов с линейным дихроизмом [7]

$$|\theta(\mathbf{r})| = \arccos \sqrt{\frac{G_0(\mathbf{r}) - G^{\pi/2}(\mathbf{r})}{2G_0(\mathbf{r}) - G^{\pi/2}(\mathbf{r}) - G^0(\mathbf{r})}}, \quad (3)$$

где $G_0(\mathbf{r})$ — корреляционная функция, измеренная в случае отсутствия объекта, $G^{0,\pi/2}(\mathbf{r})$ — корреляционная функция горизонтальной и вертикальной поляризаций соответственно.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ КАРТИН ОБЪЕКТОВ С ЛИНЕЙНЫМ ДИХРОИЗМОМ МЕТОДОМ ФАНТОМНОЙ ПОЛЯРИМЕТРИИ

Схема экспериментальной реализации предложенной методики изображена на рис. 1. В качестве источника излучения использован

где α — угол наклона вектора поляризации излучения относительно горизонта, \mathbf{r} — вектор, лежащий в плоскости, перпендикулярной направлению распространения излучения, B — интегральная интенсивность излучения, прошедшего через объект, $I^\alpha(\mathbf{r})$ — пространственное распределение интенсивности структурированного оптического поля в плоскости объекта с углом наклона вектора поляризации α . Угловые скобки в формуле (1) обозначают усреднение по общему числу измерений. При этом пространственное распределение интенсивности каждого структурированного поля является случайным и независимым от распределений интенсивности других структурированных полей из набора паттернов освещения.

В качестве объектов исследования рассматриваются объекты с линейным дихроизмом, поляризационные свойства которых описываются следующей матрицей Джонса:

титан-сапфировый лазер, излучающий в непрерывном режиме на длине волны 775 нм, со средней мощностью 45 мВт. Поляризация излучения согласована с рабочей осью модулятора и соответствует линейной поляризации в направлении горизонта.

Лазерный пучок с поперечным сечением 0,3 см проходит через систему расширителя, на выходе которой диаметр пучка составляет 1,5 см. Далее лазерное излучение взаимодействует с поверхностью ПМОИ HOLOEYE LETO-2 (разрешение 1920×1080 , размер пиксела $6,4 \times 6,4$ мкм). В результате после ПМОИ формируется три пучка в одной плоскости — центральная немодулированная компонента и два пучка с одинаковым углом наклона относительно направления распространения немодулированного излучения. При этом каждый из модулируемых пучков представляет собой независимое от другого структурированное оптическое поле. После прохождения первого симметричного светоделителя в каждом из каналов перекрываются немодулированный и один из модулируемых пучков. Разделение излучения на этом светоделителе необходимо для изменения состояния поляризации одного

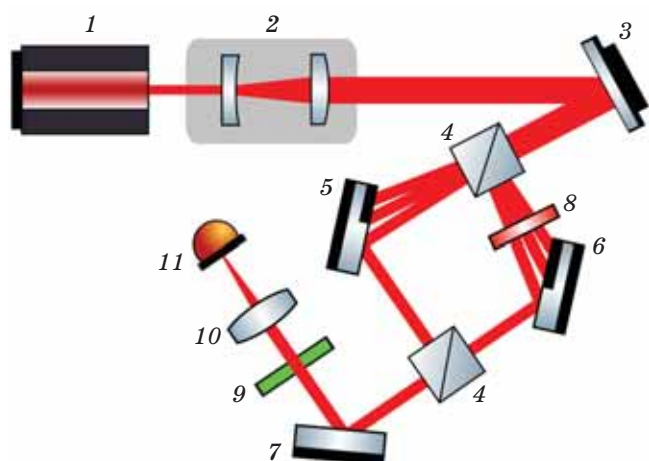


Рис. 1. Схема экспериментальной установки фантомной поляриметрии с пространственным модулятором оптического излучения. 1 — титан-сапфировый лазер, 2 — расширитель пучка, 3 — ПМОИ, 4 — светоделители 50/50, 5–7 — зеркала, 8 — полуволновая пластинка, 9 — объект, 10 — линза, 11 — однопиксельный приемник

Fig. 1. Experimental setup scheme for ghost polarimetry. (1) Titanium-sapphire laser, (2) beam expander, (3) spatial light modulator, (4) are 50/50 beam splitters, (5–7) are mirrors, (8) half-wave plate, (9) object, (10) lens, (11) bucket detector

из оптических полей на 90° с помощью полуволновой пластины. Далее с помощью двух зеркал и второго симметричного светоделителя пучки сводятся в пространстве и, таким образом, в плоскости объекта формируются два известных структурированных поля с ортогональными поляризациями. В качестве структурированных оптических полей были выбраны случайные бинарные паттерны с размером ячеек $0,5 \times 0,5$ мм. После прохождения через объект размером 1×1 см излучение попадает на систему фотоприемника, состоящую из собирающей линзы с фокусным расстоянием 5 см и интегрирующего однопиксельного приемника. Важно отметить, что реализация данной методики регистрации прошедшего через объект излучения на один приемник возможна только при условии, когда оптические поля с ортогональными поляризациями не коррелируют друг с другом.

Для создания заданных оптических полей в плоскости объекта необходимо на поверхности ПМОИ сформировать определенную фазовую маску. Так, для каждой пары заданных оптических полей на ортогональных по-

ляризациях заранее были сформированы фазовые маски с помощью алгоритма Герберта–Сакстона с использованием 25 итераций [22]. Переключение фазовых масок на поверхности ПМОИ происходило с частотой 20 Гц. При этом общее количество масок составляло 5000.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ОБЪЕКТОВ С ПОМОЩЬЮ ВЫЧИСЛЕНИЯ КОРРЕЛЯЦИОННЫХ ФУНКЦИЙ ИНТЕНСИВНОСТЕЙ

В качестве объектов исследования были выбраны объекты заданной формы из пластика, совмещенные с призмой Глана в положениях 0 , 45 и 90° .

На основе полученных из эксперимента данных по формуле (1) рассчитаны корреляционные функции интенсивностей двух наборов оптических полей, отличающихся направлениями поляризации. Далее по формуле (3) найдены модули азимуты анизотропии, которые описывают двумерные распределения поляризационных свойств объектов (рис. 2).

В результате получены двумерные распределения поляризационных свойств трех объектов с линейным дихроизмом. Далее были рассчитаны средние значения азимута анизотропии в точках, где находится каждый из объектов. Отклонение от среднего значения модуля азимута анизотропии в случае экспериментальных данных следующие: 11% — объект с поляризацией 0° , 5,5% — объект с поляризацией 45° , 13% — объект с поляризацией 90° . Таким образом, наибольшее отклонение среднего значения модуля азимута анизотропии наблюдается у объектов, направление оси поляризации которых совпадает с направлением одной из осей поляризации освещающих структурированных полей. Объяснить это можно тем фактом, что даже в случае, когда одно из осей оптических полей полностью поглощается объектом, т.е. полная интенсивность излучения оптических полей с данной поляризацией B^α равна нулю, корреляционная функция не равна нулю

$$G^\alpha(\mathbf{r}) = \langle B I^\alpha(\mathbf{r}) \rangle - \langle B \rangle \langle I^\alpha(\mathbf{r}) \rangle = \langle B^\beta I^\alpha(\mathbf{r}) \rangle - \langle B^\beta \rangle \langle I^\alpha(\mathbf{r}) \rangle, \quad (4)$$

где $\beta \neq \alpha$ — угол наклона вектора поляризации излучения относительно горизонта.

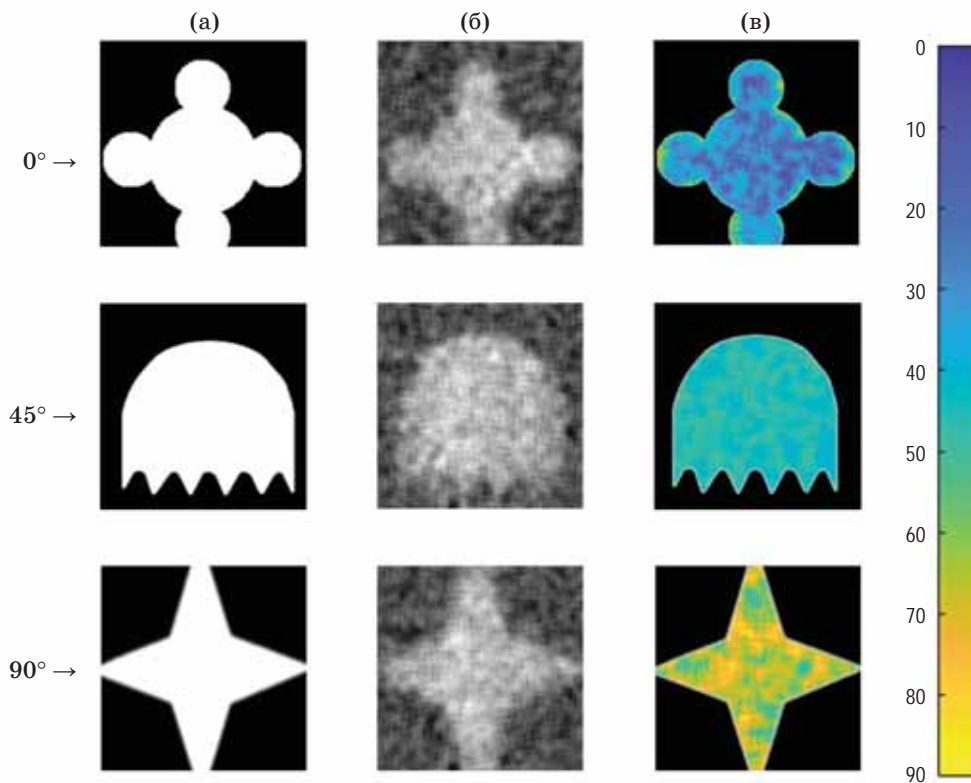


Рис. 2. Результаты экспериментов по восстановлению изображений и поляризационных свойств объектов, совмещенных с призмой Глана в положениях 0, 45 и 90°. (а) — изображение объекта, (б) — восстановленное фантомное изображение объекта, (в) — поляризационная картина, или азимут анизотропии. Справа от изображений представлена цветовая шкала азимута анизотропии

Fig. 2. Results of experiments on reconstruction of images and polarization properties of objects combined with a Glan prism in positions 0, 45 and 90°. (a) Image of the object, (б) reconstructed ghost image of the object, (в) polarization picture, or azimuth of anisotropy. To the right of the images is the azimuth of anisotropy color scale

Разность в формуле (4) обращаются в нуль только при стремлении числа измерений к бесконечности, а при конечном числе измерений значения функции колеблются возле нуля. Данная особенность вносит неточности при расчете азимута анизотропии объектов, поляризационные свойства которых соответствуют одному из направлений оси поляризации оптических полей.

Решение этой проблемы возможно при усовершенствовании системы фотоприемника с добавлением поляризационного светоделителя и еще одного однопиксельного приемника.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана установка фантомной поляриметрии с использованием пространственного модулятора оптического излучения для контроля характеристик структурированных опти-

ческих полей. В результате экспериментов по восстановлению поляризационных картин объектов с линейным дихроизмом обнаружено, что вычисленные значения азимута анизотропии находятся в соответствии с известным распределением поляризационных свойств объекта. При этом отклонения поляризационных свойств, рассчитанных с помощью методики фантомной поляриметрии, выбранных объектов относительно известных значений составляют 11, 5,5 и 13%.

В дальнейшем планируется дополнить экспериментальную установку так, чтобы использовать паттерны излучения с поляризацией 45°, а также паттерны с циркулярной поляризацией. Это позволит вычислять абсолютную величину азимута анизотропии объектов с линейным дихроизмом [23] и исследовать объекты с эллиптическим и циркулярным дихроизмом.

Важно отметить, что использование пространственного модулятора оптического излучения для формирования структурированных полей, освещающих объект, открывает большие перспективы внедрения методов машинного обучения [24] в систему фантом-

ной поляриметрии. Так, например, методы машинного обучения могут быть применены для адаптивного подбора оптических полей с целью улучшения качества поляризационных картин относительно результатов существующих систем.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Li X., Deng C., Chen M., et al. Ghost imaging for an axially moving target with an unknown constant speed // *Photonics Research*. 2015. V. 3. № 4. P. 153–157. <https://doi.org/10.1364/PRJ.3.000153>
2. Gong W., Zhao C., Yu H., et al. Three-dimensional ghost imaging lidar via sparsity constraint // *Sci. Rep.* 2016. V. 6. № 1. P. 1–6. <https://doi.org/10.1038/srep26133>
3. Karmakar S., Meyers R.E., Shih Y. Noninvasive high resolving power entangled photon quantum microscope // *J. Biomed. Opt.* 2015. V. 20. № 1. P. 016008. <https://doi.org/10.1117/1.JBO.20.1.016008>
4. Huang W., Tan W., Qin H., et al. Edge detection based on ghost imaging through biological tissue // *JOSA B*. 2023. V. 40. № 7. P. 1696–1702. <https://doi.org/10.1364/JOSAB.492919>
5. Wu J., Xie Z., Liu Z., et al. Multiple-image encryption based on computational ghost imaging // *Opt. Commun.* 2016. V. 359. P. 38–43. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2015.09.039>
6. Kellock H., Setälä T., Friberg A.T., et al. Polarimetry by classical ghost diffraction // *J. Opt.* 2014. V. 16. № 5. P. 055702. <https://doi.org/10.1088/2040-8978/16/5/055702>
7. Магницкий С. А., Агапов Д. П., Беловолов И. А. и др. Фантомная поляриметрия в классическом и квантовом свете // *Вестник Московского Университета*. 2021. Т. 3. № 6. С. 12–25.
Magnitskiy S.A., Agapov D.P., Belovolov I.A., et al. Ghost polarimetry in classical and quantum light // *Moscow University Physics Bulletin*. 2021. V. 76. № 6. P. 424–439. <https://doi.org/10.3103/S0027134921060060>
8. Morris P.A., Aspden R.S., Bell J.E.C., et al. Imaging with a small number of photons // *Nature Commun.* 2015. V. 6. № 1. P. 5913. <https://doi.org/10.1038/ncomms6913>
9. Karmakar S. На пути к 100% видимости в безлинзовых системах получения фантомных изображений в солнечном свете [in English] // *Оптический журнал*. 2020. Т. 87. № 7. С. 24–30. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2020-87-07-24-30>
Karmakar S. Towards 100% visibility in lensless ghost imaging with sunlight // *J. Opt. Technol.* 2020. V. 87. № 7. P. 405–409. <https://doi.org/10.1364/JOT.87.000405>
10. Meyers R.E., Deacon K.S., Shih Y. Turbulence-free ghost imaging // *Appl. Phys. Lett.* 2011. V. 98. № 11. P. 111115-1–111115-3. <https://doi.org/10.1063/1.3567931>
11. Shirai T., Kellock H., Setälä T., et al. Imaging through an aberrating medium with classical ghost diffraction // *JOSA A*. 2012. V. 29. № 7. P. 1288–1292. <https://doi.org/10.1364/JOSAA.29.001288>
12. Yu H., Lu R., Han S., et al. Fourier-transform ghost imaging with hard X rays // *Phys. Rev. Lett.* 2016. V. 117. № 11. P. 113901. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.117.113901>
13. Pelliccia D., Rack A., Scheel M., et al. Experimental X-ray ghost imaging // *Phys. Rev. Lett.* 2016. V. 117. № 11. P. 113902. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.117.113902>
14. Olivieri L., Gongora J.S.T., Peters L., et al. Hyperspectral terahertz microscopy via nonlinear ghost imaging // *Optica*. 2020. V. 7. № 2. P. 186–191. <https://doi.org/10.1364/OPTICA.381035>
15. Ghosh N., Vitkin I.A. Tissue polarimetry: Concepts, challenges, applications, and outlook // *J. Biomed. Opt.* 2011. V. 16. № 11. P. 110801–110801-29. <https://doi.org/10.1117/1.3652896>
16. Weinreb R.N., Zangwill L., Berry C.C., et al. Detection of glaucoma with scanning laser polarimetry // *Archives of Ophthalmology*. 1998. V. 116. № 12. P. 1583–1589. <https://doi.org/10.1001/archophth.116.12.1583>
17. Li X., Han Y., Wang H., et al. Polarimetric imaging through scattering media: A review // *Frontiers in Physics*. 2022. V. 10. P. 815296. <https://doi.org/10.3389/fphy.2022.815296>
18. Ghosh N., Banerjee A., Soni J. Turbid medium polarimetry in biomedical imaging and diagnosis // *The European Phys. J. — Appl. Phys.* 2011. V. 54. № 3. P. 30001. <https://doi.org/10.1051/epjap/2011110017>
19. Huang W., Tan W., Qin H., et al. Edge detection based on ghost imaging through biological tissue // *JOSA B*. 2023. V. 40. № 7. P. 1696–1702. <https://doi.org/10.1364/JOSAB.492919>
20. Gibson G.M., Johnson S.D., Padgett M.J. Single-pixel imaging 12 years on: A review // *Opt. Exp.* 2020. V. 28. № 19. P. 28190–28208. <https://doi.org/10.1364/OE.403195>
21. Bromberg Y., Katz O., Silberberg Y. Ghost imaging with a single detector // *Phys. Rev. A*. 2009. V. 79. № 5. P. 053840. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.79.053840>
22. Gerchberg R.W. A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictures // *Optik*. 1972. V. 35. P. 237–246.
23. Magnitskiy S., Agapov D., Chirkin A. Ghost polarimetry with unpolarized pseudo-thermal light // *Opt. Lett.* 2020. V. 45. № 13. P. 3641–3644. <https://doi.org/10.1364/OL.387234>
24. Титаренко М. А., Малашин Р. О. Исследование способностей нейронных сетей к извлечению и использованию семантической информации при обучении восстановлению зашумлённых изображений // *Оптический журнал*. 2022. Т. 89. № 2. С. 25–35. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2022-89-02-25-35>
Titarenko M.A., Malashin R.O. Study of the ability of neural networks to extract and use semantic information when they are trained to reconstruct noisy images // *J. Opt. Technol.* 2022. V. 89. № 2. P. 81–88. <https://doi.org/10.1364/JOT.89.000081>

АВТОРЫ

Владимир Сергеевич Шумигай — студент, лаборант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Россия; Scopus ID: 57854003700; <https://orcid.org/0000-0001-8597-1196>; vshumigay@itmo.ru

Полина Евгеньевна Морева — студент, лаборант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Россия; <https://orcid.org/0009-0008-5771-2419>; morepolinamore@gmail.com

Борис Александрович Наседкин — кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Россия; Scopus ID: 56543625300; <https://orcid.org/0000-0002-4507-8616>; banasedkin@itmo.ru

Азат Олфатович Исмагилов — кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Россия; Scopus ID: 57195673891; <https://orcid.org/0000-0002-5844-2966>; ismagilov.azat@itmo.ru

Алексей Викторович Черных — кандидат физико-математических наук, младший научный сотрудник, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Россия; Scopus ID: 56034206000; <https://orcid.org/0000-0003-1297-3267>; chernykh_a@itmo.ru

Андрей Алексеевич Гайдаш — кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Россия; Scopus ID: 56400865700; <https://orcid.org/0000-0001-9870-9285>; andrei_gaidash@itmo.ru

Антон Владимирович Козубов — кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Россия; Scopus ID: 57035361700; <https://orcid.org/0000-0002-4468-5406>; avkozubov@itmo.ru

Алексей Дониславович Киселев — доктор физико-математических наук, доцент, главный научный сотрудник, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Россия; Scopus ID: 7202780078; <https://orcid.org/0000-0002-1023-3284>; adkiselev@itmo.ru

Антон Николаевич Цыпкин — доктор физико-математических наук, доцент, директор научно-образовательного центра, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Россия; Scopus ID: 56366230300; <https://orcid.org/0000-0002-9254-1116>; tsyppkinan@itmo.ru

AUTHORS

Vladimir S. Shumigai — Student, Laboratory Assistant, ITMO University, St. Petersburg, 197101, Russia; Scopus ID: 57854003700; <https://orcid.org/0000-0001-8597-1196>; vshumigay@itmo.ru

Polina E. Moreva — Student, Laboratory Assistant, ITMO University, St. Petersburg, 197101, Russia; Scopus ID: <https://orcid.org/0009-0008-5771-2419>; morepolinamore@gmail.com

Boris A. Nasedkin — PhD (Physics and Mathematics), Research Associate, ITMO University, St. Petersburg, 197101, Russia; Scopus ID: 56543625300; <https://orcid.org/0000-0002-4507-8616>; banasedkin@itmo.ru

Azat O. Ismagilov — PhD (Physics and Mathematics), Research Associate, ITMO University, St. Petersburg, 197101, Russia; Scopus ID: 57195673891; <https://orcid.org/0000-0002-5844-2966>; ismagilov.azat@itmo.ru

Alexey V. Chernykh — PhD (Physics and Mathematics), Junior Research Assistant, ITMO University, St. Petersburg, 197101, Russia; Scopus ID: 56034206000; <https://orcid.org/0000-0003-1297-3267>; chernykh_a@itmo.ru

Andrei A. Gaidash — PhD (Physics and Mathematics), Leading Research Associate, ITMO University, St. Petersburg, 197101, Russia; Scopus ID: 56400865700; <https://orcid.org/0000-0001-9870-9285>; andrei_gaidash@itmo.ru

Anton V. Kozubov — PhD (Physics and Mathematics), Head of laboratory, ITMO University, St. Petersburg, 197101, Russia; Scopus ID: 57035361700; <https://orcid.org/0000-0002-4468-5406>; avkozubov@itmo.ru

Alexei D. Kiselev — Dr. Sci. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Chief Research Associate, ITMO University, St. Petersburg, 197101, Russia; Scopus ID: 7202780078; <https://orcid.org/0000-0002-1023-3284>; adkiselev@itmo.ru

Anton N. Tsyppkin — Dr. Sci. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Director of the Scientific and Educational Center, ITMO University, St. Petersburg, 197101, Russia; Scopus ID: 56366230300; <https://orcid.org/0000-0002-9254-1116>; tsyppkinan@itmo.ru

Статья поступила в редакцию 12.11.2023
Одобрена после рецензирования 09.01.2024
Принята к печати 27.03.2024

The article was submitted to the editorial office 12.11.2023
Approved after review 09.01.2024
Accepted for publication 27.03.2024