

doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-2-227-235

УДК 535.4

Анализ фазовых изображений, полученных при использовании голографической системы регистрации на основе эффекта геометрической фазы и поляризационной камеры

Алексей Сергеевич Езерский¹, Константин Андреевич Герасимов²,
Арина Александровна Мисюра³✉

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

¹ ksafasdef@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3385-5123>

² sten2807@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9498-595X>

³ arinamisiura@gmail.com✉, <https://orcid.org/0000-0002-2663-5085>

Аннотация

Предмет исследования. Представлены результаты измерения глубины поверхности тестового объекта с применением цифровой голографии. Выполнено сравнение полученного изображения с моделью, построенной на основе документации к калибровочному слайду. **Метод.** В предложенном голографическом микроскопе вместо окуляра использована линза с эффектом геометрической фазы, которая преобразует пучок с линейной поляризацией в пару пучков с круговыми поляризациями (расходящийся и сходящийся). Для получения фазового распределения применен метод параллельного фазового сдвига. С помощью поляризационной камеры за одну экспозицию зарегистрировано четыре интерферограммы, соответствующие четырем линейным проекциям интерферирующих волн с правой и левой круговой поляризациями. **Основные результаты.** Получены голограммы фазового объекта-микрометра, по которым методом параллельного фазового сдвига проведено восстановление распределения фазового запаздывания, вносимого объектом. Для коррекции аберрации применено вычитание зарегистрированного фазового набегу освещающей волны — экспериментально полученной фазы волнового фронта без объекта. **Практическая значимость.** Разработанный цифровой голографический фазовый микроскоп на основе геометрической фазовой линзы и поляризационной камеры позволяет корректно визуализировать профиль рельефа поверхности. Микроскоп может найти применение в качестве инструмента для мониторинга состояния биологических объектов, подвергаемых внешнему воздействию.

Ключевые слова

цифровая голографическая микроскопия, голография, фазовое изображение, поляризационная камера, геометрическая фазовая линза, анализ фазовых распределений

Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации № MD-6101.2021.1.2.

Ссылка для цитирования: Езерский А.С., Герасимов К.А., Мисюра А.А. Анализ фазовых изображений, полученных при использовании голографической системы регистрации на основе эффекта геометрической фазы и поляризационной камеры // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2023. Т. 23, № 2. С. 227–235. doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-2-227-235

Analysis of the phase images obtained during the collection of a holographic registration system based on the geometric phase effect and a polarization camera

Aleksei S. Ezerski¹, Konstantin A. Gerasimov², Arina A. Misura³✉

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

¹ ksafasdef@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3385-5123>

² sten2807@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9498-595X>

³ arinamisiura@gmail.com✉, <https://orcid.org/0000-0002-2663-5085>

© Езерский А.С., Герасимов К.А., Мисюра А.А., 2023

Abstract

The results of measuring the surface depth of the test object using digital holography are presented. The resulting image was compared to a model based on the calibration slide documentation. In the presented holographic microscope, instead of an eyepiece, a lens with a geometric phase effect is used, which converts a beam with linear polarization into a pair of beams with circular polarizations (diverging and converging). The parallel phase shift method was used to obtain phase distribution. Using a polarization camera, four interferograms corresponding to four different linear projections of interfering waves with right and left circular polarizations were recorded in one exposure. Holograms of a phase object-micrometer were obtained, according to which, by the method of parallel phase shift, the distribution of phase lag introduced by the object was restored. To correct the aberration, subtraction of the recorded phase of the illuminating wave — the experimentally obtained phase of the wavefront without an object is used. The developed digital holographic phase microscope based on a geometric phase lens and a polarization camera makes it possible to correctly visualize the surface relief profile. The microscope can be used as a tool for monitoring the state of biological objects exposed to external effects.

Keywords

digital holographic microscopy, holography, phase imaging, polarizing camera, geometric phase lens, analysis of phase distributions

Acknowledgements

This work was supported by the grant of the President of the Russian Federation No. MD-6101.2021.1.2.

For citation: Ezerskii A.S., Gerasimov K.A., Misura A.A. Analysis of the phase images obtained during the collection of a holographic registration system based on the geometric phase effect and a polarization camera. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2023, vol. 23, no. 2, pp. 227–235 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-2-227-235

Введение

Цифровые методы в голографии [1] применяются во многих областях науки и техники: для исследования клеток и живых организмов [2–4], визуализации в терагерцовом диапазоне частот [5–8], в том числе совместно с методами аддитивного производства [9], в исследованиях вихревых волновых полей [9–14], планктона [15] и других взвешенных ансамблей частиц [16–20]. Имеются и другие применения: оптическая память [21, 22], объемная визуализация [23, 24], исследование оптических нелинейных свойств [25–30], тепловых полей и процессов теплопереноса [31–33], контроль сварки волокон [34, 35], профилометрия [36–40], виброметрия [41], и др. Одно из наиболее интенсивно развивающихся направлений цифровой голографии — цифровая голографическая микроскопия [42–44]. Известно, что среди методов анализа и наблюдения состояния трехмерных объектов, в которых допускается только неинвазивная диагностика, достаточно перспективным является количественная фазовая визуализация [45].

Несмотря на то, что методы количественной фазовой визуализации активно разрабатываются в последние годы, они имеют следующие слабые стороны: высокую чувствительность к внешним воздействиям и когерентный шум. Было разработано множество методов и алгоритмов, минимизирующих влияние шума [46–50]. Для преодоления когерентного шума наиболее перспективный метод — использование частично когерентного излучения [51–56]. С помощью применения интерферометров общего пути [51, 57–60] удается решить проблему чувствительности к внешним воздействиям. Применение подхода низкокогерентной цифровой голографии [52, 61] сопровождается использованием метода фазового сдвига [62, 63], который требует последовательной регистрации набора голограмм для восстановления информации о фазе волнового фронта, что ограничивает возможности изучения динамических процессов. Благодаря применению специали-

зированных камер, у которых регистрирующий сенсор покрыт матрицей микрополяризаторов [53, 64], этот недостаток можно устранить, одновременно регистрируя распределение интенсивности в четырех направлениях состояний поляризации.

В настоящей работе рассмотрены физические принципы голографического микроскопа с геометрической фазовой линзой и выполнен анализ поведения волнового фронта после прохождения через линзу. Проведено сравнение глубины поверхности исследуемого объекта, взятая из документации к объект-микрометру с глубиной, полученной с помощью цифрового голографического микроскопа, в котором использована поляризационная камера и линза с эффектом геометрической фазы в качестве окуляра.

Описание схемы установки цифрового голографического микроскопа

Экспериментальная установка собрана по классической схеме микроскопа, в котором окуляр заменен на дифракционную линзу с эффектом геометрической фазы. Преимущество предложенной схемы — возможность применения метода фазового сдвига без механических изменений в системе голографического микроскопа. Формируемая осевая голограмма регистрируется на КМОП-матрицу с массивом микрополяризаторов [65, 66]. Схема цифрового голографического микроскопа показана на рис. 1.

В рассматриваемой голографической системе излучение с длиной волны 532 нм от полупроводникового лазерного модуля (Laser) проходит через призму Глана (P), приобретает линейную поляризацию и освещает исследуемый образец (O). В качестве образца использована фазовая калибровочная мишень (Phase Focus, 303 нм, [67]), которая была разработана для верификации методов птихографии [67, 68], но может быть применена для проверки и других методов количественной фазовой визуализации. Далее световой пу-

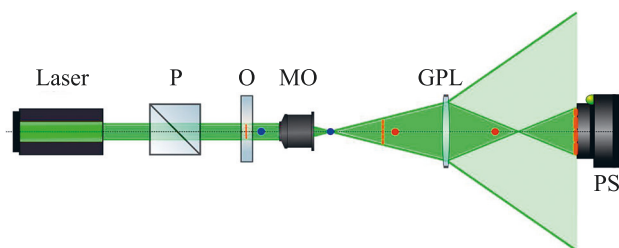


Рис. 1. Схема цифрового голографического микроскопа с геометрической фазовой линзой

Fig. 1. Diagram of a digital holographic microscope with a geometric phase lens

чок расширяется при помощи микрообъектива (МО) и проходит через дифракционную линзу с эффектом геометрической фазы (GPL, Edmund Optics, Stock Number #33-466, эффективное фокусное расстояние 100 мм). На рис. 1 красным цветом отмечены фокусы дифракционной линзы с эффектом геометрической фазы, а синим – фокусы микрообъектива. Плоская волна падает на геометрическую фазовую линзу, которая выступает в качестве окуляра и формирует два когерентных луча [53, 69]: с левой (LCP) и с правой (RCP) круговыми поляризациями. Направление круговой поляризации зависит от взаимного расположения геометрической фазовой линзы и плоскости поляризации освещающей волны. Один из пучков с круговой поляризацией переносит изображение в плоскость камеры (PS), а второй выступает в роли опорной волны. Его можно считать опорным, поскольку расфокусированное изображение в опорном пучке удалено от исследуемого изображения в предметном пучке. Благодаря методу восстановления фазы, путем вычитания волнового фронта без исследуемого образца, нивелируется влияние искажений освещающего волнового фронта [53, 69]. Несмотря на то, что соотношение интенсивностей интерферирующих полей отличается на порядок, этого достаточно для регистрации фазового набегга [70]. Подробное формирование изображения в разработанном микроскопе с геометрической фазовой линзой описаны в работе [65].

Восстановление фазового изображения объекта и определение глубины поверхности фазового объект-микрометра

Рассмотрим вариант устранения искривления волнового фронта, который включает в себя запись дополнительной цифровой голограммы для поля, невозмущенного объектом [65]. В этом случае возможно получить разности фаз из распределений интенсивностей (I) интерферограммы (рис. 2) для волнового фронта без объекта. При вычитании поля, невозмущенного объектом, из разности фаз волн с объектом извлекается фазовое распределение образца.

Определим разность фаз для фоновых полей:

$$\Delta\varphi_{bg} = \text{angle}(\exp(i(\varphi_{bg-} - \varphi_{bg+}))), \quad (1)$$

где angle — функция, возвращающая значение фазового угла (в интервале от $-\pi$ до $+\pi$) от комплексного

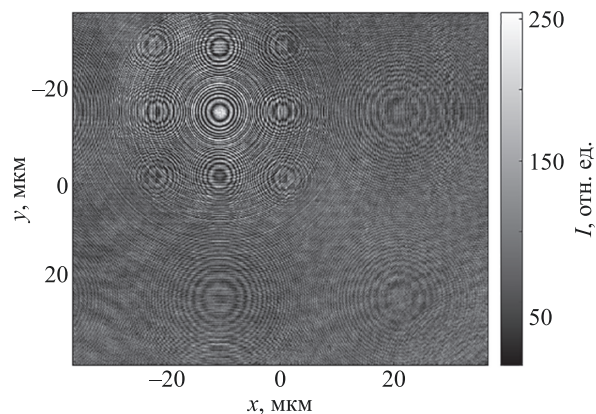


Рис. 2. Изображение зарегистрированной интерференционной картины в отсутствие исследуемого объекта

Fig. 2. Image of the recorded interference pattern without the investigated object

значения аргумента; φ_{bg-} и φ_{bg+} — фазы расходящихся и сходящихся волновых фронтов.

При вычитании разности фаз фоновых полей (1) из разности фаз волн с объектом получим фазовое распределение образца:

$$\varphi_{ob} = \text{angle}(\exp(i(\Delta\varphi(x, y) - \Delta\varphi_{bg}(x, y)))),$$

где $\Delta\varphi(x, y)$ — величина восстановленного распределения фаз.

На калибровочном слайде (рис. 3, а) показан второй фрагмент седьмой группы [67], который оптимально сочетается с полем зрения прибора. Определение глубины поверхности фазового объект-микрометра выполним с помощью численного расчета разности хода оптических лучей в материале объект-микрометра и воздухе:

$$d = \frac{\lambda\varphi}{2\pi(n-1)}, \quad (2)$$

где λ — длина волны излучения; n — показатель преломления подложки.

В работе [67] получено значение показателя преломления подложки для длины волны $\lambda = 635$ нм. В результате расчет дисперсионной кривой [71] для материала подложки SiO_2 показал, что при переходе с длины волны 635 нм на 532 нм изменение показателя преломления $\delta_n = 0,0037$.

Подставим значения $\lambda = 532$ нм и $n = 1,4668$ в уравнение (2) и получим среднюю глубину рельефа $d = 320$ нм с максимальным отклонением 20 нм.

Проведем фурье-анализ полученного восстановленного фазового изображения калибровочного слайда (рис. 4). Видно наличие множественных порядков дифракции, которые образуются после прохождения света через дифракционную линзу с эффектом геометрической фазы. Блокируя большую часть луча перед дифракционной линзой с эффектом геометрической фазы, половина лучей проходит в соседнюю полуплоскость после фокусировки (рис. 1), и можно различить до четырех вторичных порядков дифракции [65].

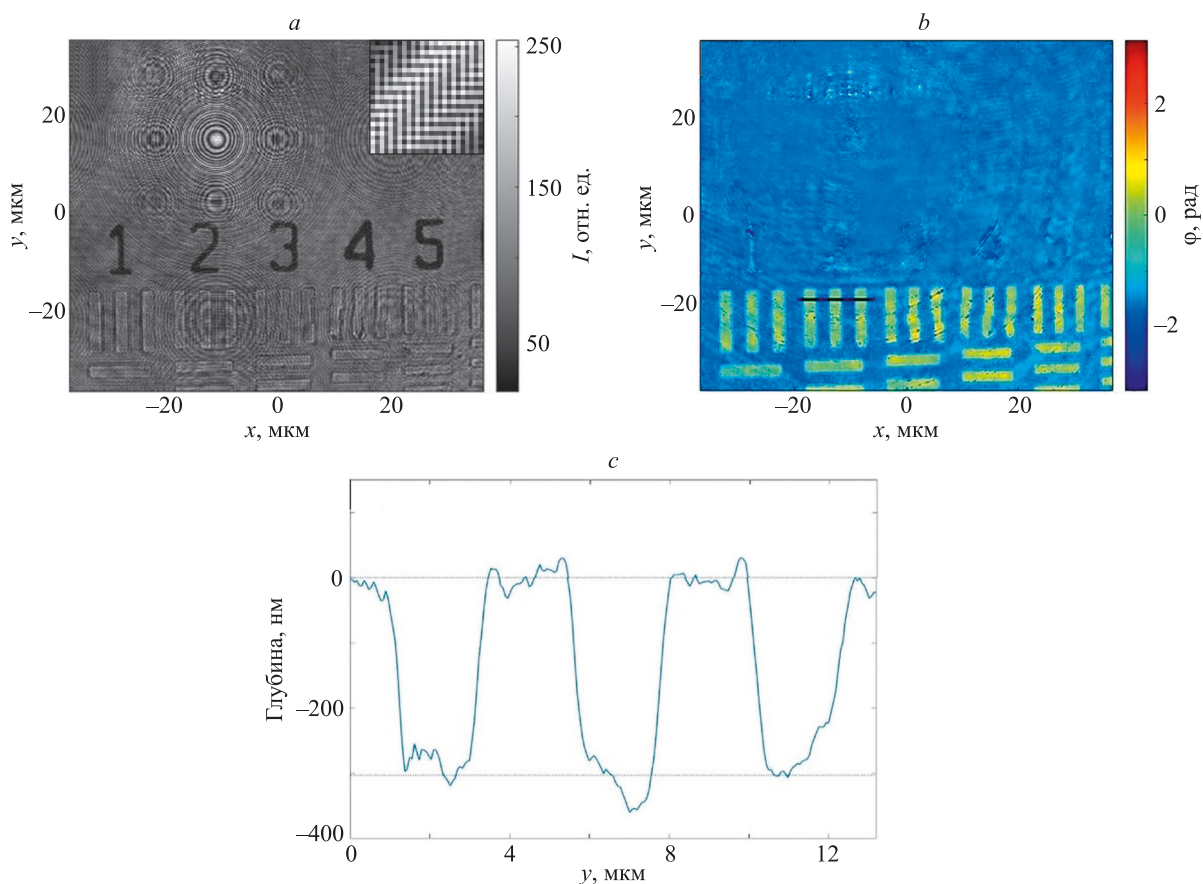


Рис. 3. Голограмма, записанная на поляризационном матричном фотоприемнике (a); восстановленное фазовое изображение калибровочного слайда, на изображении которого черной линией обозначено место проведения поперечного сечения (b); профиль поперечного сечения (c).

На вставке рис. 3, a: типичный увеличенный фрагмент микроструктуры распределения интенсивности, регистрируемой на матрице размером 10×10 пикселей поляризационной камеры

Fig. 3. Hologram recorded on a polarization matrix photoreceiver (a); reconstructed phase image of the calibration slide with the location of the cross-section indicated by a black line (b); profile of the cross-section (c).

Insert in Fig. 3, a: typical enlarged fragment of the microstructure of the intensity distribution registered on a 10×10 pixel matrix of the polarization camera

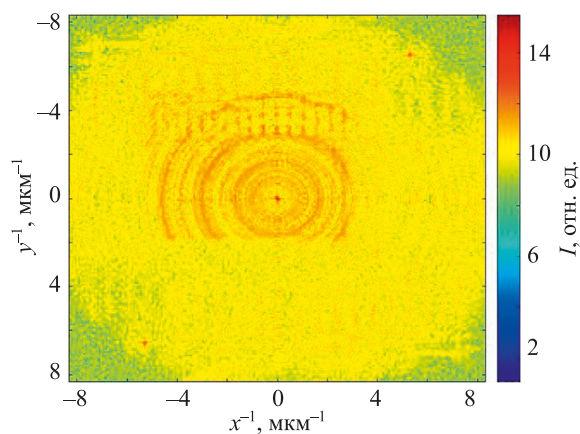


Рис. 4. Распределение модуля амплитуды фурье-образа в логарифмическом масштабе регистрируемой голограммы

Fig. 4. Distribution of Fourier image amplitude modulus in logarithmic scale of recorded hologram

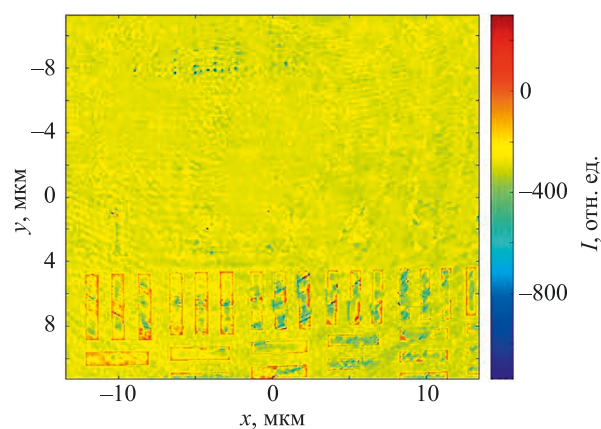


Рис. 5. Разность рельефов калибровочного слайда, полученных экспериментально и при помощи моделирования

Fig. 5. Difference in relief of the calibration slide obtained experimentally and by modeling

На рис. 5 показана разность рельефов калибровочного слайда, полученных экспериментально и при помощи моделирования. Коэффициент взаимной корреляции двух изображений равен $R = 0,8385$. Наибольшее отклонение наблюдаем в областях границ канавок фазового объект-микрометра.

Выводы

Метод визуализации на основе схемы с геометрической фазовой линзой в настоящее время успешно применен при решении задач формирования [72–74] и детектирования [74–76] волнового фронта с заданными характеристиками. В дальнейшем, при решении задачи доставки пробного структурированного излучения к исследуемому образцу (что может быть сделано с помощью дихроичного зеркала [77], или волоконного тейпера [78]), разработанный микроскоп может найти применение в качестве инструмента для мониторинга состояния биологических объектов, подвергаемых внешнему воздействию. Метод параллельного фазового сдвига, используемый в рассмотренном приборе, позво-

ляет исследовать динамические изменения морфологических характеристик объекта до, в момент и после воздействия на него структурированным излучением.

Заключение

В работе представлены записи цифровых голограмм калибровочного слайда (рис. 3, а), из которых извлечены фазовые изображения с использованием процедуры вычитания зарегистрированного фазового набегав освещающей волны. На основании восстановленных изображений определена глубина канавок второго фрагмента седьмой группы фазового объект-микрометра. Согласно полученным измерениям, ее значение варьируется от 300 до 340 нм. Глубина канавок, заявленная производителем, составляет 303 нм. Коэффициент корреляции $R = 0,8385$ показал малое различие между изображением идеального калибровочного слайда и его восстановленным фазовым изображением. Учитывая простоту и скорость проведения измерений, предложенная схема может быть применена для определения размеров образца.

Литература

1. ГОСТ Р 59321.3. Оптика и фотоника ГОЛОГРАФИЯ Часть 3. Голография цифровая и компьютерная. Термины и определения, 2021.
2. Kemper B., von Bally G. Digital holographic microscopy for live cell applications and technical inspection // *Applied Optics*. 2008. V. 47. N 4. P. A52. <https://doi.org/10.1364/ao.47.000a52>
3. Cacace T., Bianco V., Ferraro P. Quantitative phase imaging trends in biomedical applications // *Optics and Lasers in Engineering*. 2020. V. 135. P. 106188. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2020.106188>
4. Alam Z., Poddar R. An in-vivo depth-resolved imaging of developing zebrafish microstructure and microvasculature using swept-source optical coherence tomography angiography // *Optics and Lasers in Engineering*. 2022. V. 156. P. 107087. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2022.107087>
5. Kulya M.S., Balbekin N.S., Gredyuhina I.V., Uspenskaya M.V., Nechiporenko A.P., Petrov N.V. Computational terahertz imaging with dispersive objects // *Journal of Modern Optics*. 2017. V. 64. N 13. P. 1283–1288. <https://doi.org/10.1080/09500340.2017.1285064>
6. Kulya M., Semenova V., Gorodetsky A., Bepalov V.G., Petrov N.V. Spatio-temporal and spatio-spectral metrology of terahertz broadband uniformly topologically charged vortex beams // *Applied Optics*. 2019. V. 58. N 5. P. A90. <https://doi.org/10.1364/ao.58.000a90>
7. Balbekin N.S., Kulya M.S., Belashov A.V., Gorodetsky A., Petrov N.V. Increasing the resolution of the reconstructed image in terahertz pulse time-domain holography // *Scientific Reports*. 2019. V. 9. N 1. P. 180. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-36642-3>
8. Petrov N.V., Sokolenko B., Kulya M.S., Gorodetsky A., Chernykh A.V. Design of broadband terahertz vector and vortex beams: II. Holographic assessment // *Light: Advanced Manufacturing*. 2022. V. 3. N 44. <https://doi.org/10.37188/lam.2022.044>
9. Grachev Y.V., Kokliushkin V.A., Petrov N.V. Open-source 3D-printed terahertz pulse time-domain holographic detection module // *Applied Optics*. 2022. V. 61. N 5. P. B307. <https://doi.org/10.1364/ao.444979>
10. Khoroshun A.N., Chernykh A.V., Kucher S.V., Tsymbaluk A.N. Optimal parameters of a shearing interferometer with a singular light source // *Journal of Optical Technology*. 2012. V. 79. N 1. P. 9–11. <https://doi.org/10.1364/jot.79.000009>
11. Petrov N.V., Pavlov P.V., Malov A.N. Numerical simulation of optical vortex propagation and reflection by the methods of scalar diffraction theory // *Quantum Electronics*. 2013. V. 43. N 6. P. 582–587. <https://doi.org/10.1070/qe2013v043n06abeh015190>
12. Porfirev A.P., Khonina S.N. Simple method for efficient reconfigurable optical vortex beam splitting: erratum // *Optics*

References

1. GOST R. 59321.3 *Optics and photonics. Holography. Part 3. Digital and computer holography. Terms and definitions*. 2021. (in Russian)
2. Kemper B., von Bally G. Digital holographic microscopy for live cell applications and technical inspection. *Applied Optics*, 2008, vol. 47, no. 4, pp. A52. <https://doi.org/10.1364/ao.47.000a52>
3. Cacace T., Bianco V., Ferraro P. Quantitative phase imaging trends in biomedical applications. *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, vol. 135, pp. 106188. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2020.106188>
4. Alam Z., Poddar R. An in-vivo depth-resolved imaging of developing zebrafish microstructure and microvasculature using swept-source optical coherence tomography angiography. *Optics and Lasers in Engineering*, 2022, vol. 156, pp. 107087. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2022.107087>
5. Kulya M.S., Balbekin N.S., Gredyuhina I.V., Uspenskaya M.V., Nechiporenko A.P., Petrov N.V. Computational terahertz imaging with dispersive objects. *Journal of Modern Optics*, 2017, vol. 64, no. 13, pp. 1283–1288. <https://doi.org/10.1080/09500340.2017.1285064>
6. Kulya M., Semenova V., Gorodetsky A., Bepalov V.G., Petrov N.V. Spatio-temporal and spatio-spectral metrology of terahertz broadband uniformly topologically charged vortex beams. *Applied Optics*, 2019, vol. 58, no. 5, pp. A90. <https://doi.org/10.1364/ao.58.000a90>
7. Balbekin N.S., Kulya M.S., Belashov A.V., Gorodetsky A., Petrov N.V. Increasing the resolution of the reconstructed image in terahertz pulse time-domain holography. *Scientific Reports*, 2019, vol. 9, no. 1, pp. 180. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-36642-3>
8. Petrov N.V., Sokolenko B., Kulya M.S., Gorodetsky A., Chernykh A.V. Design of broadband terahertz vector and vortex beams: II. Holographic assessment. *Light: Advanced Manufacturing*, 2022, vol. 3, pp. 44. <https://doi.org/10.37188/lam.2022.044>
9. Grachev Y.V., Kokliushkin V.A., Petrov N.V. Open-source 3D-printed terahertz pulse time-domain holographic detection module. *Applied Optics*, 2022, vol. 61, no. 5, pp. B307. <https://doi.org/10.1364/ao.444979>
10. Khoroshun A.N., Chernykh A.V., Kucher S.V., Tsymbaluk A.N. Optimal parameters of a shearing interferometer with a singular light source. *Journal of Optical Technology*, 2012, vol. 79, no. 1, pp. 9–11. <https://doi.org/10.1364/jot.79.000009>
11. Petrov N.V., Pavlov P.V., Malov A.N. Numerical simulation of optical vortex propagation and reflection by the methods of scalar diffraction theory. *Quantum Electronics*, 2013, vol. 43, no. 6, pp. 582–587. <https://doi.org/10.1070/qe2013v043n06abeh015190>

- Express. 2017. V. 25. N 25. P. 32214. <https://doi.org/10.1364/oe.25.032214>
13. Khoroshun A.N., Chernyk A.V., Tsimbaluk A.N., Kirichenko J.A., Yezhov P.V., Kim J.-T. Experimental realization of an axial optical vortex beam synthesis using a Gaussian beam and two ramps from a spatial light modulator // *Proceedings of SPIE*. 2013. V. 9066. P. 90660P. <https://doi.org/10.1117/12.2049059>
 14. Bekshaev A., Chernykh A., Khoroshun A., Masajada J., Popiolek-Masajada A., Riazantsev A. Controllable singular skeleton formation by means of the Kummer optical-vortex diffraction at a rectilinear phase step // *Journal of Optics*. 2021. V. 23. N 3. P. 034002. <https://doi.org/10.1088/2040-8986/abcea7>
 15. Демин В.В., Макаров А.В., Половцев И.Г. Регистрация планктона с помощью имитатора погружаемой голографической камеры // *Оптика атмосферы и океана*. 2006. Т. 19. № 4. С. 312–318.
 16. Бразовский В.В., Вагнер В.А., Евстигнеев В.В., Еськов А.В., Пролубников В.И., Тубалов Н.П. Голографический метод исследования дисперсного состава аэрозоля // *Горизонты образования*. 2006. № 8. С. 1–9.
 17. Nikolaeva T.Y., Petrov N.V. Characterization of particles suspended in a volume of optical medium at high concentrations by coherent image processing // *Optical Engineering*. 2015. V. 54. N 8. P. 083101. <https://doi.org/10.1117/1.oe.54.8.083101>
 18. Nikolaeva T.Y., Petrov N.V. Statistical study of coherent images of particles in the volume of optical medium // *Proceedings of SPIE*. 2014. V. 9216. P. 921612. <https://doi.org/10.1117/12.2061671>
 19. Vovk T.A., Petrov N.V. Correlation characterization of particles in volume based on peak-to-basement ratio // *Scientific Reports*. 2017. V. 7. P. 43840. <https://doi.org/10.1038/srep43840>
 20. Ларкин А.И. Визуализация и распознавание треков частиц методами когерентной лазерной голографии // *Научная визуализация*. 2018. Т. 10. № 1. С. 49–55. <https://doi.org/10.26583/sv.10.1.03>
 21. Betin A.Y., Bobrinev V.I., Odinkov S.B., Evtikhiev N.N., Starikov R.S., Starikov S.N., Zlokazov E.Yu. Holographic memory optical system based on computer-generated Fourier holograms // *Applied Optics*. 2013. V. 52. N 33. P. 8142–8145. <https://doi.org/10.1364/ao.52.008142>
 22. Hesselink L., Orlov S.S., Bashaw M.C. Holographic data storage systems // *Proceedings of the IEEE*. 2004. V. 92. N 8. P. 1231–1280. <https://doi.org/10.1109/jproc.2004.831212>
 23. Cheremkhin P.A., Evtikhiev N.N., Krasnov V.V., Kulakov M.N., Kurbatova E.A., Molodtsov D.Y., Rodin V.G. Demonstration of digital hologram recording and 3D-scenes reconstruction in real-time // *Proceedings of SPIE*. 2016. V. 9889. P. 98891M. <https://doi.org/10.1117/12.2227767>
 24. Ferraro P., Grilli S., Alfieri D., De Nicola S., Finizio A., Pierattini G., Javidi B., Coppola G., Striano V. Extended focused image in microscopy by digital holography // *Optics Express*. 2005. V. 13. N 18. P. 6738–6749. <https://doi.org/10.1364/oe.13.006738>
 25. Nalegaev S.S., Belashov A.V., Petrov N.V. Application of photothermal digital interferometry for nonlinear refractive index measurements within a Kerr approximation // *Optical Materials*. 2017. V. 69. P. 437–443. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2017.03.030>
 26. Momgaudis B., Guizard S., Bilde A., Melnikaitis A. Nonlinear refractive index measurements using time-resolved digital holography // *Optics Letters*. 2018. V. 43. N 2. P. 304–307. <https://doi.org/10.1364/ol.43.000304>
 27. Petrov N.V., Nalegaev S.S., Belashov A.V., Shevkunov I.A., Putilin S.E., Lin Y.C., Cheng C.J. Time-resolved inline digital holography for the study of noncollinear degenerate phase modulation // *Optics Letters*. 2018. V. 43. N 15. P. 3481. <https://doi.org/10.1364/ol.43.003481>
 28. Belashov A.V., Cheng C.-J., Petrov N.V. Noncollinear degenerate phase modulation in samples with inhomogeneous optical nonlinear properties [Invited] // *Applied Optics*. 2021. V. 60. N 10. P. B14–B2. <https://doi.org/10.1364/AO.415102>
 29. Белашов А.В., Чжень Ч.-Ж., Петров Н.В. О возможности исследования доли неоднородностей оптических нелинейных сред с помощью осевой цифровой голографии с временным разрешением // *Журнал технической физики*. 2021. Т. 91. № 5. С. 846–854. <https://doi.org/10.21883/JTF.2021.05.50699.340-20>
 30. Belashov A., Shevkunov I.A., Kolesova E.P., Orlova A.O., Putilin S.E., Veniaminov A.V., Cheng C.-J., Petrov N.V. Investigation of nonlinear optical properties of quantum dots deposited onto a sample glass using time-resolved inline digital holography // *Journal*
 12. Porfirev A.P., Khonina S.N. Simple method for efficient reconfigurable optical vortex beam splitting: erratum. *Optics Express*, 2017, vol. 25, no. 25, pp. 32214. <https://doi.org/10.1364/oe.25.032214>
 13. Khoroshun A.N., Chernyk A.V., Tsimbaluk A.N., Kirichenko J.A., Yezhov P.V., Kim J.-T. Experimental realization of an axial optical vortex beam synthesis using a Gaussian beam and two ramps from a spatial light modulator. *Proceedings of SPIE*, 2013, vol. 9066, pp. 90660P. <https://doi.org/10.1117/12.2049059>
 14. Bekshaev A., Chernykh A., Khoroshun A., Masajada J., Popiolek-Masajada A., Riazantsev A. Controllable singular skeleton formation by means of the Kummer optical-vortex diffraction at a rectilinear phase step. *Journal of Optics*, 2021, vol. 23, no. 3, pp. 034002. <https://doi.org/10.1088/2040-8986/abcea7>
 15. Dyomin V.V., Makarov A.V., Polovtsev I.G. Plankton detection using a simulator of a submersible holographic camera. *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2006, vol. 19, no. 4, pp. 277–283.
 16. Brazovskii V.V., Vagner V.A., Evstigneev V.V., Eskov A.V., Prolubnikov V.I., Tubalov N.P. Holographic method for studying the disperse composition of an aerosol. *Gorizonty obrazovaniya*, 2006, no. 8, pp. 1–9. (in Russian)
 17. Nikolaeva T.Y., Petrov N.V. Characterization of particles suspended in a volume of optical medium at high concentrations by coherent image processing. *Optical Engineering*, 2015, vol. 54, no. 8, pp. 083101. <https://doi.org/10.1117/1.oe.54.8.083101>
 18. Nikolaeva T.Y., Petrov N.V. Statistical study of coherent images of particles in the volume of optical medium. *Proceedings of SPIE*, 2014, vol. 9216, pp. 921612. <https://doi.org/10.1117/12.2061671>
 19. Vovk T.A., Petrov N.V. Correlation characterization of particles in volume based on peak-to-basement ratio. *Scientific Reports*, 2017, vol. 7, pp. 43840. <https://doi.org/10.1038/srep43840>
 20. Larkin A.I. Visualization and recognition of the particle tracks by methods of coherent laser holography. *Scientific Visualization*, 2018, vol. 10, no. 1, pp. 49–55. (in Russian). <https://doi.org/10.26583/sv.10.1.03>
 21. Betin A.Y., Bobrinev V.I., Odinkov S.B., Evtikhiev N.N., Starikov R.S., Starikov S.N., Zlokazov E.Yu. Holographic memory optical system based on computer-generated Fourier holograms. *Applied Optics*, 2013, vol. 52, no. 33, pp. 8142–8145. <https://doi.org/10.1364/ao.52.008142>
 22. Hesselink L., Orlov S.S., Bashaw M.C. Holographic data storage systems. *Proceedings of the IEEE*, 2004, vol. 92, no. 8, pp. 1231–1280. <https://doi.org/10.1109/jproc.2004.831212>
 23. Cheremkhin P.A., Evtikhiev N.N., Krasnov V.V., Kulakov M.N., Kurbatova E.A., Molodtsov D.Y., Rodin V.G. Demonstration of digital hologram recording and 3D-scenes reconstruction in real-time. *Proceedings of SPIE*, 2016, vol. 9889, pp. 98891M. <https://doi.org/10.1117/12.2227767>
 24. Ferraro P., Grilli S., Alfieri D., De Nicola S., Finizio A., Pierattini G., Javidi B., Coppola G., Striano V. Extended focused image in microscopy by digital holography. *Optics Express*, 2005, vol. 13, no. 18, pp. 6738–6749. <https://doi.org/10.1364/oe.13.006738>
 25. Nalegaev S.S., Belashov A.V., Petrov N.V. Application of photothermal digital interferometry for nonlinear refractive index measurements within a Kerr approximation. *Optical Materials*, 2017, vol. 69, pp. 437–443. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2017.03.030>
 26. Momgaudis B., Guizard S., Bilde A., Melnikaitis A. Nonlinear refractive index measurements using time-resolved digital holography. *Optics Letters*, 2018, vol. 43, no. 2, pp. 304–307. <https://doi.org/10.1364/ol.43.000304>
 27. Petrov N.V., Nalegaev S.S., Belashov A.V., Shevkunov I.A., Putilin S.E., Lin Y.C., Cheng C.J. Time-resolved inline digital holography for the study of noncollinear degenerate phase modulation. *Optics Letters*, 2018, vol. 43, no. 15, pp. 3481. <https://doi.org/10.1364/ol.43.003481>
 28. Belashov A.V., Cheng C.-J., Petrov N.V. Noncollinear degenerate phase modulation in samples with inhomogeneous optical nonlinear properties [Invited]. *Applied Optics*, 2021, vol. 60, no. 10, pp. B14–B2. <https://doi.org/10.1364/AO.415102>
 29. Belashov A.V., Cheng C.J., Petrov N.V. On the possibility of studying the fraction of inhomogeneities in optical nonlinear media using time-resolved inline digital holography. *Technical Physics*, 2021, vol. 66, no. 5, pp. 681–689. <https://doi.org/10.1134/s1063784221050042>
 30. Belashov A., Shevkunov I.A., Kolesova E.P., Orlova A.O., Putilin S.E., Veniaminov A.V., Cheng C.-J., Petrov N.V. Investigation of nonlinear optical properties of quantum dots deposited onto a sample glass using time-resolved inline digital holography. *Journal*

- of Imaging. 2022. V. 8. N 3. P. 74. <https://doi.org/10.3390/jimaging8030074>
31. Kumar V., Shakher C. Study of heat dissipation process from heat sink using lensless Fourier transform digital holographic interferometry // *Applied Optics*. 2015. V. 54. N 6. P. 1257–1266. <https://doi.org/10.1364/AO.54.001257>
32. Belashov A.V., Petrov N.V., Semenova I.V., Vasyutinskii O.S. Digital holographic micro-interferometry of nonradiative transitions in biological specimens // *Proceedings of SPIE*. 2015. V. 9529. P. 95290G. <https://doi.org/10.1117/12.2184900>
33. Creath K., Schwartz G.E. Dynamic visible interferometric measurement of thermal fields around living biological objects // *Proceedings of SPIE*. 2004. V. 5531. P. 24–31. <https://doi.org/10.1117/12.562306>
34. Конин Ю.А., Гаранин А.И., Перминов А.В. Дефектоскопия оптических волокон и заготовок методом голографической интерферометрии // *Прикладная фотоника*. 2015. Т. 2. № 2. С. 154–165.
35. Prisiazhniuk A.V., Sokolenko B.V., Poletaev D.A., Shostka N.V. Digital holographic testing of the optical fiber at welding area // *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. V. 1400. N 6. P. 066042. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1400/6/066042>
36. Yamaguchi I., Kato J., Ohta S. Surface shape measurement by phase-shifting digital holography // *Optical Review*. 2001. V. 8. N 2. P. 85–89. <https://doi.org/10.1007/s10043-001-0085-6>
37. Yamaguchi I., Ohta S., Kato J. Surface contouring by phase-shifting digital holography // *Optics and Lasers in Engineering*. 2001. V. 36. N 5. P. 417–428. [https://doi.org/10.1016/S0143-8166\(01\)00069-0](https://doi.org/10.1016/S0143-8166(01)00069-0)
38. Dong J., Jia S., Jiang C. Surface shape measurement by multi-illumination lensless Fourier transform digital holographic interferometry // *Optics Communications*. 2017. V. 402. P. 91–96. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2017.05.051>
39. Belashov A.V., Petrov N.V. Improvement of rough surfaces height map reconstruction accuracy in tilt angle illumination digital holography // *Optical Engineering*. 2020. V. 59. N 10. P. 102414. <https://doi.org/10.1117/1.OE.59.10.102414>
40. Katkovnik V., Shevkunov I., Petrov N.V., Egiazarian K. Multiwavelength surface contouring from phase-coded noisy diffraction patterns: wavelength-division optical setup // *Optical Engineering*. 2018. V. 57. N 8. P. 085105. <https://doi.org/10.1117/1.OE.57.8.085105>
41. Verrier N., Alloul L., Gross M. Vibration of low amplitude imaged in amplitude and phase by sideband versus carrier correlation digital holography // *Optics Letters*. 2015. V. 40. N 3. P. 411–414. <https://doi.org/10.1364/OL.40.000411>
42. Тычинский В.П. Когерентная фазовая микроскопия внутриклеточных процессов // *Успехи физических наук*. 2001. Т. 171. № 6. С. 649–662. <https://doi.org/10.3367/UFNr.0171.200106e.0649>
43. Belashov A.V., Zhikhoreva A.A., Belyaeva T.N., Kornilova E.S., Petrov N.V., Salova A.V., Semenova I.V., Vasyutinskii O.S. Digital holographic microscopy in label-free analysis of cultured cells' response to photodynamic treatment // *Optics Letters*. 2016. V. 41. N 21. P. 5035. <https://doi.org/10.1364/OL.41.005035>
44. Hu Y., Zuo C., Sun J., Chen Q., Zhang Y. A compact and lensless digital holographic microscope setup // *Proceedings of SPIE*. 2015. V. 9524. P. 952426. <https://doi.org/10.1117/12.2189634>
45. Popescu G. *Quantitative Phase Imaging of Cells and Tissues*. First edition. New York: McGraw-Hill Education, 2011. 384 p.
46. Montresor S., Picart P. Quantitative appraisal for noise reduction in digital holographic phase imaging // *Optics Express*. 2016. V. 24. N 13. P. 14322. <https://doi.org/10.1364/OE.24.014322>
47. Katkovnik V., Shevkunov I.A., Petrov N.V., Egiazarian K. Wavefront reconstruction in digital off-axis holography via sparse coding of amplitude and absolute phase // *Optics Letters*. 2015. V. 40. N 10. P. 2417–2420. <https://doi.org/10.1364/OL.40.002417>
48. Katkovnik V., Shevkunov I., Petrov N.V., Egiazarian K. High-accuracy off-axis wavefront reconstruction from noisy data: local least square with multiple adaptive windows // *Optics Express*. 2016. V. 24. N 22. P. 25068. <https://doi.org/10.1364/OE.24.025068>
49. Belashov A.V., Petrov N.V., Semenova I.V. Digital off-axis holographic interferometry with simulated wavefront // *Optics Express*. 2014. V. 22. N 23. P. 28363–28376. <https://doi.org/10.1364/OE.22.028363>
50. Bianco V., Memmolo P., Leo M., Montresor S., Distanto C., Paturzo M., Picart P., Javidi B., Ferraro P. Strategies for reducing speckle noise in digital holography // *Light: Science & Applications*. 2018. V. 7. N 1. P. 1–16. <https://doi.org/10.1038/s41377-018-0050-9>
- of Imaging, 2022, vol. 8, no. 3, pp. 74. <https://doi.org/10.3390/jimaging8030074>
31. Kumar V., Shakher C. Study of heat dissipation process from heat sink using lensless Fourier transform digital holographic interferometry. *Applied Optics*, 2015, vol. 54, no. 6, pp. 1257–1266. <https://doi.org/10.1364/AO.54.001257>
32. Belashov A.V., Petrov N.V., Semenova I.V., Vasyutinskii O.S. Digital holographic micro-interferometry of nonradiative transitions in biological specimens. *Proceedings of SPIE*, 2015, vol. 9529, pp. 95290G. <https://doi.org/10.1117/12.2184900>
33. Creath K., Schwartz G.E. Dynamic visible interferometric measurement of thermal fields around living biological objects. *Proceedings of SPIE*, 2004, vol. 5531, pp. 24–31. <https://doi.org/10.1117/12.562306>
34. Konin Iu.A., Garaniin A.I., Perminov A.V. Defectoscopy of optical fibers and preforms by method holographic interferometry. *Applied Photonics*, 2015, vol. 2, no. 2, pp. 154–165. (in Russian)
35. Prisiazhniuk A.V., Sokolenko B.V., Poletaev D.A., Shostka N.V. Digital holographic testing of the optical fiber at welding area. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, vol. 1400, no. 6, pp. 066042. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1400/6/066042>
36. Yamaguchi I., Kato J., Ohta S. Surface shape measurement by phase-shifting digital holography. *Optical Review*, 2001, vol. 8, no. 2, pp. 85–89. <https://doi.org/10.1007/s10043-001-0085-6>
37. Yamaguchi I., Ohta S., Kato J. Surface contouring by phase-shifting digital holography. *Optics and Lasers in Engineering*, 2001, vol. 36, no. 5, pp. 417–428. [https://doi.org/10.1016/S0143-8166\(01\)00069-0](https://doi.org/10.1016/S0143-8166(01)00069-0)
38. Dong J., Jia S., Jiang C. Surface shape measurement by multi-illumination lensless Fourier transform digital holographic interferometry. *Optics Communications*, 2017, vol. 402, pp. 91–96. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2017.05.051>
39. Belashov A.V., Petrov N.V. Improvement of rough surfaces height map reconstruction accuracy in tilt angle illumination digital holography. *Optical Engineering*, 2020, vol. 59, no. 10, pp. 102414. <https://doi.org/10.1117/1.OE.59.10.102414>
40. Katkovnik V., Shevkunov I., Petrov N.V., Egiazarian K. Multiwavelength surface contouring from phase-coded noisy diffraction patterns: wavelength-division optical setup. *Optical Engineering*, 2018, vol. 57, no. 8, pp. 085105. <https://doi.org/10.1117/1.OE.57.8.085105>
41. Verrier N., Alloul L., Gross M. Vibration of low amplitude imaged in amplitude and phase by sideband versus carrier correlation digital holography. *Optics Letters*, 2015, vol. 40, no. 3, pp. 411–414. <https://doi.org/10.1364/OL.40.000411>
42. Tyichinskii V.P. Coherent phase microscopy of intracellular processes. *Physics-Uspekhi*, 2001, vol. 44, no. 6, pp. 617–629. <https://doi.org/10.1070/PU2001V044N06ABEH000841>
43. Belashov A.V., Zhikhoreva A.A., Belyaeva T.N., Kornilova E.S., Petrov N.V., Salova A.V., Semenova I.V., Vasyutinskii O.S. Digital holographic microscopy in label-free analysis of cultured cells' response to photodynamic treatment. *Optics Letters*, 2016, vol. 41, no. 21, pp. 5035. <https://doi.org/10.1364/OL.41.005035>
44. Hu Y., Zuo C., Sun J., Chen Q., Zhang Y. A compact and lensless digital holographic microscope setup. *Proceedings of SPIE*, 2015, vol. 9524, pp. 952426. <https://doi.org/10.1117/12.2189634>
45. Popescu G. *Quantitative Phase Imaging of Cells and Tissues*. First edition. New York, McGraw-Hill Education, 2011, 384 p.
46. Montresor S., Picart P. Quantitative appraisal for noise reduction in digital holographic phase imaging. *Optics Express*, 2016, vol. 24, no. 13, pp. 14322. <https://doi.org/10.1364/OE.24.014322>
47. Katkovnik V., Shevkunov I.A., Petrov N.V., Egiazarian K. Wavefront reconstruction in digital off-axis holography via sparse coding of amplitude and absolute phase. *Optics Letters*, 2015, vol. 40, no. 10, pp. 2417–2420. <https://doi.org/10.1364/OL.40.002417>
48. Katkovnik V., Shevkunov I., Petrov N.V., Egiazarian K. High-accuracy off-axis wavefront reconstruction from noisy data: local least square with multiple adaptive windows. *Optics Express*, 2016, vol. 24, no. 22, pp. 25068. <https://doi.org/10.1364/OE.24.025068>
49. Belashov A.V., Petrov N.V., Semenova I.V. Digital off-axis holographic interferometry with simulated wavefront. *Optics Express*, 2014, vol. 22, no. 23, pp. 28363–28376. <https://doi.org/10.1364/OE.22.028363>
50. Bianco V., Memmolo P., Leo M., Montresor S., Distanto C., Paturzo M., Picart P., Javidi B., Ferraro P. Strategies for reducing speckle noise in digital holography. *Light: Science & Applications*, 2018, vol. 7, no. 1, pp. 1–16. <https://doi.org/10.1038/s41377-018-0050-9>

51. Choi K., Joo K.-I., Lee T.-H., Kim H.-R., Yim J., Do H., Min S.-W. Compact self-interference incoherent digital holographic camera system with real-time operation // *Optics Express*. 2019. V. 27. N 4. P. 4818. <https://doi.org/10.1364/oe.27.004818>
52. Rosen J., Vijayakumar A., Kumar M., Rai M.R., Kelner R., Kashter Y., Bulbul A., Mukherjee S. Recent advances in self-interference incoherent digital holography // *Advances in Optics and Photonics*. 2019. V. 11. N 1. P. 1–66. <https://doi.org/10.1364/aop.11.000001>
53. DeMars L.A., Mikuła-Zdańkowska M., Falaggis K., Porras-Aguilar R. Single-shot phase calibration of a spatial light modulator using geometric phase interferometry // *Applied Optics*. 2020. V. 59. N 13. P. D125–D130. <https://doi.org/10.1364/ao.383610>
54. Hong J., Kim M.K. Single-shot self-interference incoherent digital holography using off-axis configuration // *Optics Letters*. 2013. V. 38. N 23. P. 5196. <https://doi.org/10.1364/ol.38.005196>
55. Nguyen C.M., Muhammad D., Kwon H.-S. Spatially incoherent common-path off-axis color digital holography // *Applied Optics*. 2018. V. 57. N 6. P. 1504. <https://doi.org/10.1364/ao.57.001504>
56. Quan X., Matoba O., Awatsuji Y. Single-shot incoherent digital holography using a dual-focusing lens with diffraction gratings // *Optics Letters*. 2017. V. 42. N 3. P. 383. <https://doi.org/10.1364/ol.42.000383>
57. Nguyen T.H., Edwards C., Goddard L.L., Popescu G. Quantitative phase imaging with partially coherent illumination // *Optics Letters*. 2014. V. 39. N 19. P. 5511. <https://doi.org/10.1364/ol.39.005511>
58. Kumar M., Matoba O., Quan X., Rajput S.K., Awatsuji Y., Tamada Y. Single-shot common-path off-axis digital holography: applications in bioimaging and optical metrology [Invited] // *Applied Optics*. 2021. V. 60. N 4. P. A195. <https://doi.org/10.1364/ao.404208>
59. Bouchal P., Štrbková L., Dostál Z., Chmelík R., Bouchal Z. Geometric-phase microscopy for quantitative phase imaging of isotropic, birefringent and space-variant polarization samples // *Scientific Reports*. 2019. V. 9. N 1. P. 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-40441-9>
60. Mico V., Zalevsky Z., García J. Common-path phase-shifting digital holographic microscopy: A way to quantitative phase imaging and superresolution // *Optics Communications*. 2008. V. 281. N 17. P. 4273–4281. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2008.04.079>
61. Hong J., Kim M. Overview of techniques applicable to self-interference incoherent digital holography // *Journal of the European Optical Society: Rapid Publications*. 2013. V. 8. P. 13077. <https://doi.org/10.2971/jeos.2013.13077>
62. Kim M.K. Incoherent digital holographic adaptive optics // *Applied Optics*. 2013. V. 52. N 1. P. A117–A130. <https://doi.org/10.1364/ao.52.00a117>
63. Shevkunov I., Petrov N.V. Phase retardation analysis in a rotated plane-parallel plate for phase-shifting digital holography // *Journal of Imaging*. 2022. V. 8. N 4. P. 87. <https://doi.org/10.3390/jimaging8040087>
64. Awatsuji Y., Sasada M., Kubota T. Parallel quasi-phase-shifting digital holography // *Applied Physics Letters*. 2004. V. 85. N 6. P. 1069–1071. <https://doi.org/10.1063/1.1777796>
65. Chernykh A.V., Ezerskii A.S., Georgieva A.O., Petrov N.V. Study on object wavefront sensing in parallel phase-shifting camera with geometric phase lens // *Proceedings of SPIE*. 2021. V. 11898. P. 118980X. <https://doi.org/10.1117/12.2602841>
66. Chernykh A.V., Georgieva A.O., Ezerskii A.S., Petrov N.V. Simple self-interference microscope design with geometric phase lens and polarization camera // *Proc. of the Frontiers in Optics + Laser Science*. 2021. P. JW7A.118. <https://doi.org/10.1364/FIO.2021.JW7A.118>
67. Godden T.M., Muñoz-Piniella A., Claverley J.D., Yacoot A., Humphry M.J. Phase calibration target for quantitative phase imaging with ptychography // *Optics Express*. 2016. V. 24. N 7. P. 7679. <https://doi.org/10.1364/oe.24.007679>
68. Shevkunov I., Georgieva A., Belashov A., Petrov N.V. Ptychography with DMD-based complex-valued probe // *Proc. of the OSA Imaging and Applied Optics Congress (3D, COSI, DH, ISA, pcAOP)*. 2021. P. DM6C.6. <https://doi.org/10.1364/DH.2021.DM6C.6>
69. Choi K., Yim J., Min S.-W. Achromatic phase shifting self-interference incoherent digital holography using linear polarizer and geometric phase lens // *Optics Express*. 2018. V. 26. N 13. P. 16212–16225. <https://doi.org/10.1364/oe.26.016212>
70. Wolley O., Mekhail S., Moreau P.-A., Gregory T., Gibson G., Leuchs G., Padgett M.J. Imaging below the camera noise floor with
51. Choi K., Joo K.-I., Lee T.-H., Kim H.-R., Yim J., Do H., Min S.-W. Compact self-interference incoherent digital holographic camera system with real-time operation. *Optics Express*, 2019, vol. 27, no. 4, pp. 4818. <https://doi.org/10.1364/oe.27.004818>
52. Rosen J., Vijayakumar A., Kumar M., Rai M.R., Kelner R., Kashter Y., Bulbul A., Mukherjee S. Recent advances in self-interference incoherent digital holography. *Advances in Optics and Photonics*, 2019, vol. 11, no. 1, pp. 1–66. <https://doi.org/10.1364/aop.11.000001>
53. DeMars L.A., Mikuła-Zdańkowska M., Falaggis K., Porras-Aguilar R. Single-shot phase calibration of a spatial light modulator using geometric phase interferometry. *Applied Optics*, 2020, vol. 59, no. 13, pp. D125–D130. <https://doi.org/10.1364/ao.383610>
54. Hong J., Kim M.K. Single-shot self-interference incoherent digital holography using off-axis configuration. *Optics Letters*, 2013, vol. 38, no. 23, pp. 5196. <https://doi.org/10.1364/ol.38.005196>
55. Nguyen C.M., Muhammad D., Kwon H.-S. Spatially incoherent common-path off-axis color digital holography. *Applied Optics*, 2018, vol. 57, no. 6, pp. 1504. <https://doi.org/10.1364/ao.57.001504>
56. Quan X., Matoba O., Awatsuji Y. Single-shot incoherent digital holography using a dual-focusing lens with diffraction gratings. *Optics Letters*, 2017, vol. 42, no. 3, pp. 383. <https://doi.org/10.1364/ol.42.000383>
57. Nguyen T.H., Edwards C., Goddard L.L., Popescu G. Quantitative phase imaging with partially coherent illumination. *Optics Letters*, 2014, vol. 39, no. 19, pp. 5511. <https://doi.org/10.1364/ol.39.005511>
58. Kumar M., Matoba O., Quan X., Rajput S.K., Awatsuji Y., Tamada Y. Single-shot common-path off-axis digital holography: applications in bioimaging and optical metrology [Invited]. *Applied Optics*, 2021, vol. 60, no. 4, pp. A195. <https://doi.org/10.1364/ao.404208>
59. Bouchal P., Štrbková L., Dostál Z., Chmelík R., Bouchal Z. Geometric-phase microscopy for quantitative phase imaging of isotropic, birefringent and space-variant polarization samples. *Scientific Reports*, 2019, vol. 9, no. 1, pp. 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-40441-9>
60. Mico V., Zalevsky Z., García J. Common-path phase-shifting digital holographic microscopy: A way to quantitative phase imaging and superresolution. *Optics Communications*, 2008, vol. 281, no. 17, pp. 4273–4281. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2008.04.079>
61. Hong J., Kim M. Overview of techniques applicable to self-interference incoherent digital holography. *Journal of the European Optical Society: Rapid Publications*, 2013, vol. 8, pp. 13077. <https://doi.org/10.2971/jeos.2013.13077>
62. Kim M.K. Incoherent digital holographic adaptive optics. *Applied Optics*, 2013, vol. 52, no. 1, pp. A117–A130. <https://doi.org/10.1364/ao.52.00a117>
63. Shevkunov I., Petrov N.V. Phase retardation analysis in a rotated plane-parallel plate for phase-shifting digital holography. *Journal of Imaging*, 2022, vol. 8, no. 4, pp. 87. <https://doi.org/10.3390/jimaging8040087>
64. Awatsuji Y., Sasada M., Kubota T. Parallel quasi-phase-shifting digital holography. *Applied Physics Letters*, 2004, vol. 85, no. 6, pp. 1069–1071. <https://doi.org/10.1063/1.1777796>
65. Chernykh A.V., Ezerskii A.S., Georgieva A.O., Petrov N.V. Study on object wavefront sensing in parallel phase-shifting camera with geometric phase lens. *Proceedings of SPIE*, 2021, vol. 11898, pp. 118980X. <https://doi.org/10.1117/12.2602841>
66. Chernykh A.V., Georgieva A.O., Ezerskii A.S., Petrov N.V. Simple self-interference microscope design with geometric phase lens and polarization camera. *Proc. of the Frontiers in Optics + Laser Science*, 2021, pp. JW7A.118. <https://doi.org/10.1364/FIO.2021.JW7A.118>
67. Godden T.M., Muñoz-Piniella A., Claverley J.D., Yacoot A., Humphry M.J. Phase calibration target for quantitative phase imaging with ptychography. *Optics Express*, 2016, vol. 24, no. 7, pp. 7679. <https://doi.org/10.1364/oe.24.007679>
68. Shevkunov I., Georgieva A., Belashov A., Petrov N.V. Ptychography with DMD-based complex-valued probe. *Proc. of the OSA Imaging and Applied Optics Congress (3D, COSI, DH, ISA, pcAOP)*, 2021, pp. DM6C.6. <https://doi.org/10.1364/DH.2021.DM6C.6>
69. Choi K., Yim J., Min S.-W. Achromatic phase shifting self-interference incoherent digital holography using linear polarizer and geometric phase lens. *Optics Express*, 2018, vol. 26, no. 13, pp. 16212–16225. <https://doi.org/10.1364/oe.26.016212>
70. Wolley O., Mekhail S., Moreau P.-A., Gregory T., Gibson G., Leuchs G., Padgett M.J. Imaging below the camera noise floor with

- a homodyne microscope // arXiv. 2022. arXiv:2208.04898. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2208.04898>
71. Mikhail Polyanskiy. *RefractiveIndex.INFO website* [Электронный ресурс]. URL: <https://refractiveindex.info/> (дата обращения: 10.05.2008).
 72. Georgieva A.O., Belashov A.V., Petrov N.V. Complex wavefront manipulation and holographic correction based on digital micromirror device: a study of spatial resolution and discretisation // *Proceedings of SPIE*. 2020. V. 11294. P. 112940B. <https://doi.org/10.1117/12.2547702>
 73. Georgieva A., Belashov A.V., Petrov N.V. Optimization of DMD-based independent amplitude and phase modulation by analysis of target complex wavefront // *Scientific Reports*. 2022. V. 12. N 1. P. 7754. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-11443-x>
 74. Georgieva A., Ezerskii A., Chernykh A., Petrov N. Numerical displacement of target wavefront formation plane with DMD-based modulation and geometric phase holographic registration system // *Atmospheric and Oceanic Optics*. 2022. V. 35. N 3. P. 258–265. <https://doi.org/10.1134/s1024856022030034>
 75. Khonina S.N., Khorin P.A., Serafimovich P.G., Dzyuba A.P., Georgieva A.O., Petrov N.V. Analysis of the wavefront aberrations based on neural networks processing of the interferograms with a conical reference beam // *Applied Physics B*. 2022. V. 128. N 3. P. 60. <https://doi.org/10.1007/s00340-022-07778-y>
 76. Khorin P.A., Serafimovich P.G., Dzyuba A.P., Georgieva A.O., Petrov N.V., Khonina S.N. Comparing of linear and conical interferograms for wavefront aberrations analysis based on neural networks // *Proceedings of SPIE*. 2022. V. 12295. P. 122950Q. <https://doi.org/10.1117/12.2630978>
 77. Linares-Loyez J., Ferreira J.S., Rossier O., Lounis B., Giannone G., Groc L., Cognet L., Bon P. Self-interference (SELF) microscopy for live super-resolution imaging and single particle tracking in 3D // *Frontiers in Physics*. 2019. V. 7. P. 68. <https://doi.org/10.3389/fphy.2019.00068>
 78. Егорова Д.А., Куликов А.В., Мухтубаев А.Б. Метод и технология доставки оптического излучения к биологическим микрообъектам // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2017. Т. 17. № 5. С. 775–781. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2017-17-5-775-781>
 - a homodyne microscope. *arXiv*, 2022, arXiv:2208.04898. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2208.04898>
 71. Mikhail Polyanskiy. *RefractiveIndex.INFO website*. Available at: <https://refractiveindex.info/> (accessed: 10.05.2008).
 72. Georgieva A.O., Belashov A.V., Petrov N.V. Complex wavefront manipulation and holographic correction based on digital micromirror device: a study of spatial resolution and discretization. *Proceedings of SPIE*, 2020, vol. 11294, pp. 112940B. <https://doi.org/10.1117/12.2547702>
 73. Georgieva A., Belashov A.V., Petrov N.V. Optimization of DMD-based independent amplitude and phase modulation by analysis of target complex wavefront. *Scientific Reports*, 2022, vol. 12, no. 1, pp. 7754. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-11443-x>
 74. Georgieva A., Ezerskii A., Chernykh A., Petrov N. Numerical displacement of target wavefront formation plane with DMD-based modulation and geometric phase holographic registration system. *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2022, vol. 35, no. 3, pp. 258–265. <https://doi.org/10.1134/s1024856022030034>
 75. Khonina S.N., Khorin P.A., Serafimovich P.G., Dzyuba A.P., Georgieva A.O., Petrov N.V. Analysis of the wavefront aberrations based on neural networks processing of the interferograms with a conical reference beam. *Applied Physics B*, 2022, vol. 128, no. 3, pp. 60. <https://doi.org/10.1007/s00340-022-07778-y>
 76. Khorin P.A., Serafimovich P.G., Dzyuba A.P., Georgieva A.O., Petrov N.V., Khonina S.N. Comparing of linear and conical interferograms for wavefront aberrations analysis based on neural networks. *Proceedings of SPIE*, 2022, vol. 12295, pp. 122950Q. <https://doi.org/10.1117/12.2630978>
 77. Linares-Loyez J., Ferreira J.S., Rossier O., Lounis B., Giannone G., Groc L., Cognet L., Bon P. Self-interference (SELF) microscopy for live super-resolution imaging and single particle tracking in 3D. *Frontiers in Physics*, 2019, vol. 7, pp. 68. <https://doi.org/10.3389/fphy.2019.00068>
 78. Egorova D.A., Kulikov A.V., Mukhtubaev A.B. Method and technology of delivering optical radiation to biological micro-objects. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2017, vol. 17, no. 5, pp. 775–781. (in Russian). <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2017-17-5-775-781>

Авторы

Езерский Алексей Сергеевич — студент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, orcid.org/0000-0002-3385-5123, ksafasdef@gmail.com

Герасимов Константин Андреевич — студент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0002-9498-595X>, sten2807@mail.ru

Мисюра Арина Александровна — студент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0002-2663-5085>, arinamisiura@gmail.com

Authors

Aleksei S. Ezerskii — Student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, orcid.org/0000-0002-3385-5123, ksafasdef@gmail.com

Konstantin A. Gerasimov — Student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-9498-595X>, sten2807@mail.ru

Arina A. Misura — Student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-2663-5085>, arinamisiura@gmail.com

Статья поступила в редакцию 19.12.2022

Одобрена после рецензирования 21.02.2023

Принята к печати 31.03.2023

Received 19.12.2022

Approved after reviewing 21.02.2023

Accepted 31.03.2023



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»