

УДК 535.417; 535.317; 778.38

ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ ОБЪЕКТА НА ОПТИМАЛЬНЫЕ, С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ КАЧЕСТВА ВОССТАНОВЛЕННОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ, УРОВНИ БИНАРИЗАЦИИ ГОЛОГРАММЫ

С.Н. Корешев^а, С.О. Старовойтов^а

^а Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

Адрес для переписки: s.starovoitov95@gmail.com

Информация о статье

Поступила в редакцию 02.05.18, принята к печати 29.05.18

doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-4-567-572

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Корешев С.Н., Старовойтов С.О. Влияние структуры объекта на оптимальные, с точки зрения качества восстановленного изображения, уровни бинаризации голограммы // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2018. Т. 18. № 4. С. 567–572. doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-4-567-572

Аннотация

Предмет исследования. Проведено исследование влияния структуры объекта, т.е. вида и размеров составляющего его элементов, на оптимальный, с точки зрения качества восстановленного изображения, уровень бинаризации синтезированных голограмм-проекторов Френеля. **Метод.** Исследование выполнено путем проведения математического моделирования синтеза и восстановления в виртуальном пространстве голограмм различных объектов с характеристическим размером 80×80 нм при разном уровне бинаризации голограммы и сравнения качества восстановленных изображений. Все численные эксперименты проводились с помощью специализированного программного комплекса при следующих значениях параметров синтеза и восстановления голограмм: длина волны используемого излучения 13,5 нм, размер пикселя голограммы 20×20 нм, расстояние между плоскостями объекта и голограммы 20,3 мкм, угол падения опорной волны 18,1°. Критерий качества восстановленного изображения выражался через число градаций при пороговой обработке этого изображения, при котором распределение интенсивности в восстановленном изображении было бы идентично распределению интенсивности в исходном объекте. **Основные результаты.** Получены графики зависимости числа допустимых градаций при пороговой обработке изображения от уровня бинаризации голограммы. Для исследованных объектов-бинарных транспарантов они представляют собой кривые с двумя ярко выраженными пиками, расположенными чаще всего на уровнях 0,2 и 0,34 по оси бинаризации. Структура объекта оказывает влияние на конкретное численное значение этих оптимальных уровней бинаризации и на максимальное число допустимых градаций при пороговой обработке восстановленного изображения, при этом общий характер исследуемой зависимости сохраняется и для наиболее сложных по структуре объектов-транспарантов. **Практическая значимость.** Выявленная зависимость позволит ускорить выбор оптимального уровня бинаризации синтезированных голограмм.

Ключевые слова

голограмма, синтезированная голограмма, восстановление голограммы, бинаризация

OBJECT STRUCTURE EFFECT ON OPTIMAL LEVELS OF HOLOGRAM BINARIZATION IN TERMS OF RECONSTRUCTED IMAGE QUALITY

S.N. Koreshev^a, S.O. Starovoitov^a

^а ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

Corresponding author: s.starovoitov95@gmail.com

Article info

Received 02.05.18, accepted 29.05.18

doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-4-567-572

Article in Russian

For citation: Koreshev S.N., Starovoitov S.O. Object structure effect on optimal levels of hologram binarization in terms of reconstructed image quality. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2018, vol. 18, no. 4, pp. 567–572 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-4-567-572

Abstract

Subject of Research. The paper presents research results on object structure effect, that is the type and size of its elements, on optimal level of computer generated Fresnel holograms binarization in terms of reconstructed image quality. **Method.** The study was carried out through mathematical modeling of synthesis and reconstruction of holograms of various objects with 80x80 nm pixel size using different binarization levels, and comparing the quality of reconstructed images. All numerical experiments were carried out in a software package for the synthesis and reconstruction of holograms using the following hologram synthesis and reconstruction parameters: wavelength equal to 13.5 nm, hologram pixel size equal to 20x20 nm, distance between object and hologram planes of 20.3 μm , reference beam angle of 18.1°. A criterion for the quality estimation of reconstructed image was a number of gradations in the threshold processing of this image, in which the intensity distribution in the reconstructed image would be identical to the intensity distribution in the original object. **Main Results.** The dependency graphs between binarization level and the number of permissible gradations for threshold image processing are obtained. For binary transparency objects used in the research, they are curves with two pronounced peaks, usually located at levels 0.2 and 0.34 along binarization axis. The object structure has an effect on specific value of optimal binarization level and on the maximum number of threshold processing gradations; the general nature of researched dependency remains unchanged even for complex transparency objects. **Practical Relevance.** The revealed dependency gives the possibility to accelerate the optimal level choice of synthesized holograms binarization.

Keywords

hologram, synthesized hologram, hologram reconstruction, binarization, threshold processing, reconstructed image quality

Введение

Применение синтезированных голограмм в оплотехнике позволяет в ряде случаев существенно улучшить эксплуатационные характеристики создаваемых оптических приборов. Среди задач, наиболее успешно решаемых с помощью синтезированных голограмм и систем на их основе, можно выделить пространственную фильтрацию излучения, контроль качества поверхностей оптических деталей [1, 2], голографическую фотолитографию [3, 4], а также мультимедийные проекционные системы [5–8]. Создание синтезированной голограммы происходит в виртуальном пространстве. Голограмма рассчитывается с помощью специализированного программного обеспечения и хранится в памяти компьютера в форме двумерного массива, ячейки которого содержат значения интенсивности голографического поля для каждой из точек голограммы. В случае необходимости она может быть отображена на реальном носителе и использована для физического восстановления в лазерном излучении. Синтезированная таким образом голограмма является дискретной, что приводит к мультипликации спектра голограммы [9] и оказывает влияние на восстанавливаемое с ее помощью изображение [10]. В проведенных ранее исследованиях были установлены требования к параметрам синтеза голограмм, среди которых – рабочая длина волны используемого излучения, характеристический размер объекта и голограммы, угол падений опорной волны, которые бы обеспечивали оптимизацию процесса синтеза голограммы и восстановление качественного изображения [11].

Важной особенностью большинства синтезированных голограмм, пригодных для применения на практике, является их бинарность. Для случая фотолитографии это связано с тем, что современные лазерные генераторы изображения способны точно передать лишь две градации коэффициента пропускания синтезируемой голограммы по амплитуде, что приводит к необходимости перехода от голограммы – полутонового транспаранта к бинарной голограмме. Кроме того, бинарные голограммы пригодны для отображения с помощью DLP (Digital Light Processing) матриц, представляющих собой набор микрозеркал, способных мгновенно отклоняться в одно из двух стандартных положений и широко используемых во многих современных мультимедийных системах [12, 13].

Бинаризация полутоновой синтезированной голограммы, содержащей, как правило, 256 градаций серого, проводится по некоему ранее выбранному уровню, находящемуся в интервале от 0 до 255. При этом каждая из ячеек массива, хранящего значение интенсивности голографического поля в точках голограммы, последовательно сравнивается с этим уровнем. Если значение интенсивности в конкретном элементе превышает пороговый уровень, оно изменяется на максимальное (255), а если нет – то на минимальное (0). Такая модификация структуры голограммы оказывает влияние на восстанавливаемое изображение и приводит к тому, что оно может отличаться от изображения, восстановленного с помощью исходной полутоновой голограммы, т.е. происходит потеря качества восстановленного изображения, не одинаковая для голограмм, бинаризованных по разным уровням. При этом существует определенный оптимальный уровень, при котором восстановленное изображение имеет наилучшее качество. Исследованию влияния структуры объекта на этот оптимальный уровень и посвящена настоящая работа.

Исследование влияния структуры объекта, т.е. вида и размеров составляющего его элементов, на оптимальный уровень бинаризации голограммы

В рамках исследования была проведена серия численных экспериментов по синтезу и восстановлению в виртуальном пространстве голограммы того или иного объекта при разном уровне бинаризации голограммы и сравнение качества восстановленных изображений. Все эксперименты проводились с помощью специализированного программного комплекса для синтеза и численного восстановления голо-

грамм-проекторов Френеля [14]. В нем объекты представляются как бинарные амплитудные транспаранты, освещаемые параллельным нормально падающим пучком лучей и располагаемые в плоскости, параллельной плоскости голограммы, так, что геометрические центры объекта и голограммы лежат на одной прямой.

В работе использовались четыре типа объектов: пары щелей размером 2×40 , 4×40 и 6×40 пикселей с разным расстоянием между щелями величиной от одного до трех пикселей, а также тест-объект «Уголки», представляющий собой крест толщиной в один пиксель и уголки толщиной от одного пикселя до трех пикселей. Физический размер одного пикселя объекта составлял 80×80 нм; синтез их голограмм проводился для длины волны восстанавливающего излучения 13,5 нм, при этом пиксель голограммы имел размер 20×20 нм, а расстояние между плоскостями объекта и голограммы было равно 20,3 мкм. Угол падения опорной волны составлял $18,1^\circ$.

Количественный критерий качества восстановленного изображения было признано удобным выражать через число градаций при пороговой обработке этого изображения, при котором распределение интенсивности в восстановленном изображении было бы идентично распределению интенсивности в исходном объекте [15]. Отсюда оптимальным, с точки зрения качества восстановленного изображения, уровнем бинаризации будет считаться уровень бинаризации, обеспечивающий наибольшее количество градаций пороговой обработки, удовлетворяющих записанному выше условию.

Ниже представлены изображения использованных в работе объектов (рис. 1) и данные о числе градаций в восстановленном с помощью полутонной синтезированной голограммы изображении каждого из этих объектов (таблица).

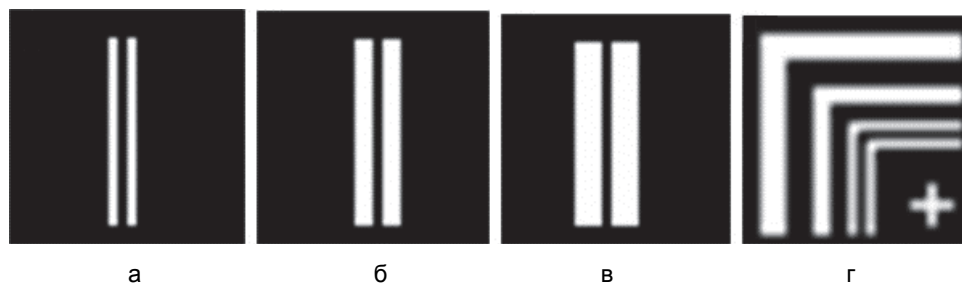


Рис. 1. Экспериментальные объекты: Щели 2×40 пикселей (а); Щели 4×40 пикселей (б); Щели 6×40 пикселей (в); Уголки (г)

Название	Щели 2×40	Щели 4×40	Щели 6×40	Уголки
Число градаций без бинаризации	140 при $d = 1$	61 при $d = 1$	38 при $d = 1$	38
	121 при $d = 2$	66 при $d = 2$	37 при $d = 2$	
	131 при $d = 3$	70 при $d = 3$	36 при $d = 3$	

Таблица. Число градаций в штуках на изображении тест-объектов для небинарной голограммы; d – расстояние между щелями (в пикселях)

Для объектов, представляющих собой пару линий, расстояние между ними в пикселях, d , составляло от одного до трех. Синтезированная голограмма каждого из объектов последовательно подвергалась бинаризации по различным уровням и восстанавливалась в ранее упомянутом программном комплексе. Уровни бинаризации для удобства работы в комплексе были нормированы относительно единицы, шаг между уровнями составлял 0,01.

Анализ результатов численного эксперимента

Оценка качества полученных изображений производилась в графическом редакторе GIMP (GNU Image Manipulation Program) с использованием инструмента обработки «Порог» (Threshold). Количество градаций подсчитывается вручную.

Для каждого из исследуемых объектов по полученным данным о числе градаций на восстановленном изображении были построены графики зависимости, где по оси абсцисс откладывались нормированные уровни бинаризации, а по оси ординат – число допустимых градаций пороговой обработки, при котором распределение интенсивности в восстановленном изображении было идентично распределению интенсивности на объекте.

Первый из тестовых объектов – пара щелей размером 2×40 пикселей – исследовался в трех вариантах: при расстояниях между щелями, равным одному, двум и трем пикселям соответственно. В результате было построено три графика зависимости числа градаций от уровня бинаризации (рис. 2).

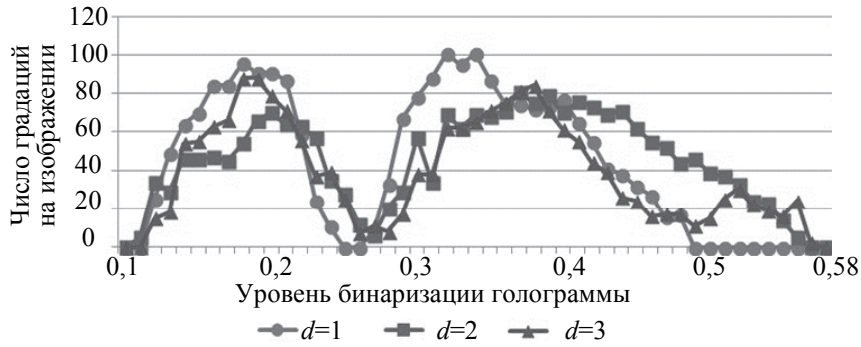


Рис. 2. Зависимость числа градаций на изображении от уровня бинаризации для объекта «Щели 2x40»; d – расстояние между щелями (в пикселях)

В данном случае можно заметить, что характер представленной на графике зависимости подтверждает полученную на основе анализа дифракционной эффективности голограмм двух объектов и представленную в работе [16] гипотезу о наличии у синтезированной голограммы двух различных оптимальных уровней бинаризации, при которых восстановленное изображение наиболее близко по распределению интенсивности к исходному объекту-фотошаблону. При этом положения этих максимумов на оси уровней бинаризации отличаются не слишком сильно, а по обеим сторонам от каждого находятся интервалы удовлетворительных уровней бинаризации, т.е. таких уровней, при которых число градаций на восстановленном изображении хоть и не максимально, но достаточно велико.

Три аналогичных графика (рис. 3) были построены и для второго из тестовых объектов – пары щелей размером 4x40 пикселей при расстояниях между щелями, равным одному, двум и трем пикселям соответственно.

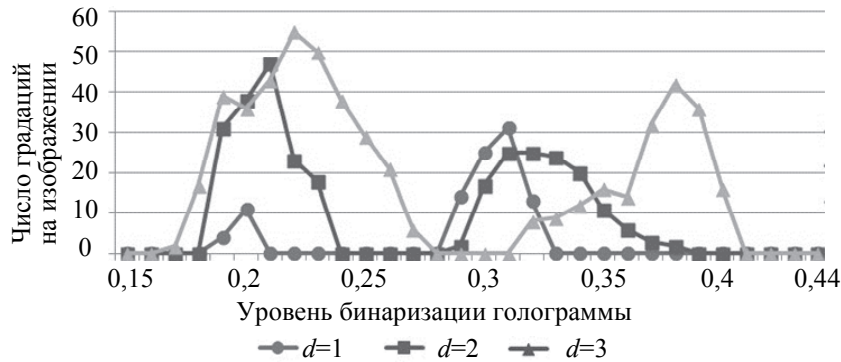


Рис. 3. Зависимость числа градаций на изображении от уровня бинаризации для объекта «Щели 4x40»; d – расстояние между щелями (в пикселях)

В данном случае также заметно наличие двух оптимальных уровней бинаризации. Однако количество градаций при пороговой обработке на каждом из них меньше, чем для объекта «Щели 2x40», а интервалы удовлетворительных уровней бинаризации, при котором на восстановленном изображении количество градаций довольно большое, являются более узкими.

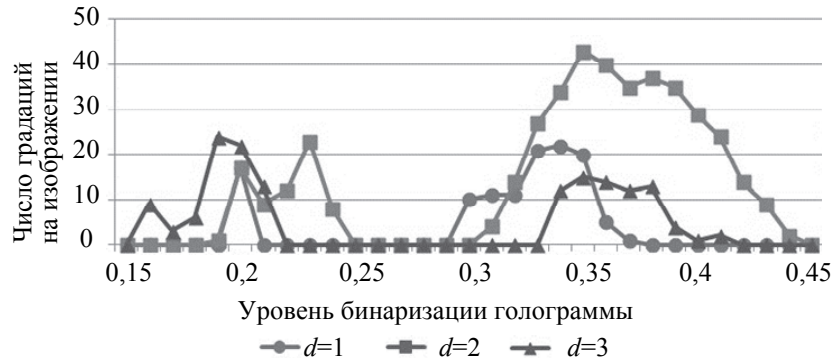


Рис. 4. Зависимость числа градаций на изображении от уровня бинаризации для объекта «Щели 6x40»; d – расстояние между щелями (в пикселях)

По результатам экспериментов были построены графики исследуемой зависимости и для третьего из тестовых объектов – пары щелей размером 6x40 (рис. 4). Эксперимент проводился для трех вариаций

объекта с расстоянием между щелями, равным одному, двум трем пикселям соответственно. Для тестовых объектов такого типа даже при оптимальном уровне бинаризации число допустимых градаций в восстановленном изображении невелико, а интервалы удовлетворительных уровней бинаризации еще уже, чем для рассмотренного выше объекта «Щели 2×40».

Рассмотрим график зависимости числа градаций на изображении от уровня бинаризации для объекта «Уголки» (рис. 5).

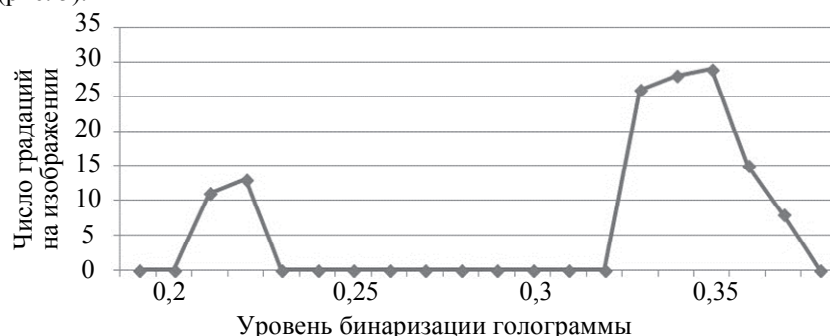


Рис. 5. Зависимость числа градаций на изображении от уровня бинаризации для объекта «Уголки»

Несмотря на то, что по структуре данный объект принципиально отличается от объектов, которые были рассмотрены ранее, общий характер исследуемой зависимости остается прежним. Небольшое число градаций на изображении при бинаризации даже по оптимальному уровню связано с тем, что тестовый объект состоит из многочисленных отдельных структур различного размера.

Проведенные исследования показали, что графики зависимости числа допустимых градаций при пороговой обработке изображения от уровня бинаризации голограммы представляют собой кривые с двумя ярко выраженными пиками вне зависимости от объекта. При этом структура объекта оказывает заметное влияние как на численное значение оптимального уровня бинаризации, так и на максимальное число допустимых градаций пороговой обработки.

Заключение

Обсуждены результаты численного эксперимента по исследованию влияния структуры объекта, т.е. вида и размеров составляющего его элементов, на оптимальный, с точки зрения качества восстановленного изображения, уровень бинаризации голограммы. Исследование выполнено методом математического моделирования с помощью специализированного комплекса синтеза и цифрового восстановления голограмм. Выявленный характер исследованной зависимости проиллюстрирован графиками зависимости допустимого числа градаций при пороговой обработке восстановленного изображения от уровня бинаризации голограммы. Установлено, что, хотя общий характер исследуемой зависимости остается постоянным для всех объектов, являющихся бинарными транспарантами, структура объекта оказывает влияние на максимальное число градаций при пороговой обработке на изображении, на значение оптимального уровня бинаризации и на ширину интервалов уровней бинаризации, при использовании которых восстановленное изображение может успешно пройти пороговую обработку.

Литература

1. Shwartz S., Golub M.A., Ruschin S. Computer generated hologram in spatial division multiplexing // *Proceedings of Frontiers in Optics*. San Jose, USA, 2015.
2. Shwartz S., Golub M.A., Ruschin S. Computer-generated holograms for fiber optical communication with spatial-division multiplexing // *Applied Optics*. 2017. V. 56. N 1. P. A31–A40. doi: 10.1364/AO.56.000A31
3. Cheng Y., Isoyan A., Wallace J., Khan M., Cerrina F. Extreme ultraviolet holographic lithography: initial results // *Applied Physics Letter*. 2007. V. 90. N 2. doi: 10.1063/1.2430774
4. Корешев С.Н., Никаноров О.В., Смородинов Д.С., Громов А.Д. Синтез голограмм-проекторов для фотолитографии на неплоских поверхностях // *Оптический журнал*. 2015. Т. 82. № 2. С. 37–42.
5. Zaperty W., Kozacki T., Kujawińska M. Multi-SLM color holographic 3D display based on RGB spatial filter // *Journal of Display Technology*. 2016. V. 12. N 12. P. 1724–1731. doi: 10.1109/JDT.2016.2615595
6. Li X., Liu J., Jia J., Pan Y., Wang Y. 3D dynamic holographic display by modulating complex amplitude experimentally // *Optics Express*. 2013. V. 21. N 18. P. 20577–20587. doi: 10.1364/OE.21.020577

References

1. Shwartz S., Golub M.A., Ruschin S. Computer generated hologram in spatial division multiplexing. *Proceedings of Frontiers in Optics*. San Jose, USA, 2015.
2. Shwartz S., Golub M.A., Ruschin S. Computer-generated holograms for fiber optical communication with spatial-division multiplexing. *Applied Optics*, 2017, vol. 56, no. 1, pp. A31–A40. doi: 10.1364/AO.56.000A31
3. Cheng Y., Isoyan A., Wallace J., Khan M., Cerrina F. Extreme ultraviolet holographic lithography: initial results. *Applied Physics Letter*, 2007, vol. 90, no. 2. doi: 10.1063/1.2430774
4. Koreshev S.N., Nikanorov O.V., Smorodinov D.S., Gromov A.D. Synthesizing hologram-projectors for photolithography on nonplanar surfaces. *Journal of Optical Technology*, 2015, vol. 82, no. 2, pp. 90–94. doi: 10.1364/JOT.82.000090
5. Zaperty W., Kozacki T., Kujawińska M. Multi-SLM color holographic 3D display based on RGB spatial filter. *Journal of Display Technology*, 2016, vol. 12, no. 12, pp. 1724–1731. doi: 10.1109/JDT.2016.2615595
6. Li X., Liu J., Jia J., Pan Y., Wang Y. 3D dynamic holographic display by modulating complex amplitude experimentally. *Optics Express*, 2013, vol. 21, no. 18, pp. 20577–20587. doi: 10.1364/OE.21.020577

7. Roh J., Kim K., E. Moon, Kim S., Yang B., Hahn J., Kim H. Full-color holographic projection display system featuring an achromatic Fourier filter // *Optics Express*. 2017. V. 25. N 13. P. 14774–14782. doi: 10.1364/OE.25.014774
8. Lin S., Kim E. Single SLM full-color holographic 3-D display based on sampling and selective frequency filtering methods // *Optics Express*. 2017. V. 25. N 10. P. 11389–11404. doi: 10.1364/OE.25.011389
9. Корешев С.Н., Никаноров О.В., Смородинов Д.С. Влияние дискретности синтезированных и цифровых голограмм на их изображающие свойства // *Компьютерная оптика*. 2016. Т. 40. № 6. С. 793–801. doi: 10.18287/2412-6179-2016-40-6-793-801
10. Xu L., Peng X., Guo Z., Miao J., Asundi A. Imaging analysis of digital holography // *Optics Express*. 2005. V. 13. N 7. P. 2444–2454. doi: 10.1364/opex.13.002444
11. Корешев С.Н., Никаноров О.В., Смородинов Д.С. Изображающие свойства дискретных голограмм. I. Влияние дискретности голограмм на восстановленное изображение // *Оптический журнал*. 2014. Т. 81. № 3. С. 14–19.
12. Sheet A., Sayed M. et al. 3D computer generated medical holograms using spatial light modulators // *Journal of Electrical Systems and Information Technology*. 2014. V. 1. N 2. P. 103–108. doi: 10.1016/j.jesit.2014.07.004
13. Huebschman M., Munjuluri B., Garner H.R. Dynamic holographic 3-D image projection // *Optics Express*. 2003. V. 11. N 5. P. 437–445. doi: 10.1364/oe.11.000437
14. Корешев С.Н., Громов А.Д., Никаноров О.В. Модернизированный комплекс синтеза и восстановления голограмм-проекторов Френеля // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2012. № 6(82). С. 12–17.
15. Корешев С.Н., Смородинов Д.С., Никаноров О.В. Влияние дискретности синтезированных и цифровых голограмм на их изображающие свойства // *Компьютерная оптика*. 2016. Т. 40. № 6. С. 793–801. doi: 10.18287/2412-6179-2016-40-6-793-801
16. Корешев С.Н., Смородинов Д.С., Громов А.Д., Никаноров О.В. Обеспечение равной интенсивности элементов изображений бинарных объектов, восстанавливаемых с помощью синтезированных голограмм-проекторов // *Оптика и спектроскопия*. 2013. Т. 114. № 2. С. 150–155. doi: 10.7868/S003040341302013X
7. Roh J., Kim K., E. Moon, Kim S., Yang B., Hahn J., Kim H. Full-color holographic projection display system featuring an achromatic Fourier filter. *Optics Express*, 2017, vol. 25, no. 13, pp. 14774–14782. doi: 10.1364/OE.25.014774
8. Lin S., Kim E. Single SLM full-color holographic 3-D display based on sampling and selective frequency filtering methods. *Optics Express*, 2017, vol. 25, no. 10, pp. 11389–11404. doi: 10.1364/OE.25.011389
9. Koreshev S.N., Nikanorov O.V., Smorodinov D.S. Influence of the discreteness of synthetic and digital holograms on their imaging properties. *Computer Optics*, 2016, vol. 40, no. 6, pp. 793–801. doi: 10.18287/2412-6179-2016-40-6-793-801
10. Xu L., Peng X., Guo Z., Miao J., Asundi A. Imaging analysis of digital holography. *Optics Express*, 2005, vol. 13, no. 7, pp. 2444–2454. doi: 10.1364/opex.13.002444
11. Koreshev S.N., Nikanorov O.V., Smorodinov D.S. Imaging properties of discrete holograms. I. How the discreteness of a hologram affects image reconstruction. *Journal of Optical Technology*, 2014, vol. 81, no. 3, pp. 123–127. doi: 10.1364/JOT.81.000123
12. Sheet A., Sayed M. et al. 3D computer generated medical holograms using spatial light modulators. *Journal of Electrical Systems and Information Technology*, 2014, vol. 1, no. 2, pp. 103–108. doi: 10.1016/j.jesit.2014.07.004
13. Huebschman M., Munjuluri B., Garner H.R. Dynamic holographic 3-D image projection. *Optics Express*, 2003, vol. 11, no. 5, pp. 437–445. doi: 10.1364/oe.11.000437
14. Koreshev S., Gromov A., Nikanorov O. Modernized software complex for synthesis and reconstruction of Fresnel holograms projectors. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2012, no. 6, pp. 12–17. (in Russian)
15. Koreshev S.N., Smorodinov D.S., Nikanorov O.V. Influence of the discreteness of synthetic and digital holograms on their imaging properties. *Computer Optics*, 2016, vol. 40, no. 6, pp. 793–801. (in Russian) doi: 10.18287/2412-6179-2016-40-6-793-801
16. Koreshev S.N., Smorodinov D.S., Nikanorov O.V., Gromov A.D. Intensity equalization for elements for binary-object images reconstructed using synthesized hologram projectors. *Optics and Spectroscopy*, 2013, vol. 114, no. 2, pp. 288–292. (in Russian) doi: 10.7868/S003040341302013X

Авторы

Корешев Сергей Николаевич – доктор технических наук, профессор, профессор, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 6603811394, ORCID ID: 0000-0002-8728-6122, koreshev@list.ru

Старовойтов Сергей Олегович – студент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0003-4429-7929, s.starovoitov95@gmail.com

Authors

Sergey N. Koreshev – D.Sc., Full Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 6603811394, ORCID ID: 0000-0002-8728-6122, koreshev@list.ru

Sergey O. Starovoitov – student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0003-4429-7929, s.starovoitov95@gmail.com