

УДК 535.8

Алгоритмы компьютерной голографии для формирования изображений в когерентных волноводных системах дополненной реальности

Гататдинов Тимур Анварович^(*) gatatdinovtimur@yandex.ru
Рымов Дмитрий Андреевич rymov.d.a@gmail.com
Злоказов Евгений Юрьевич ezlokazov@gmail.com
SPIN-код: 1202-6069

НИЯУ МИФИ, Москва, Россия

Аннотация. Рассмотрены различные алгоритмы компьютерной голографии для формирования голографических изображений в когерентных системах дополненной реальности на основе голографического волноводного перископа. Построена когерентная оптико-цифровая система на основе жидкокристаллического пространственно-временного модулятора света (ПВМС). Проведены эксперименты по восстановлению изображений с фазовых компьютерно-синтезированных голограмм Френеля. Проведен сравнительный анализ восстановленных изображений в системе с голографическим волноводом и без него.

Ключевые слова: волноводная голография, фазовые голограммы, компьютерный синтез, голограммы Френеля

Algorithms of computer-generated holography for image formation in coherent waveguide Augmented reality displays

Gatatdinov Timur Anvarovich^(*) gatatdinovtimur@yandex.ru
Rymov Dmitriy Andreevich rymov.d.a@gmail.com
Zlokazov Evgenii Yurievich ezlokazov@gmail.com
SPIN-code: 1202-6069

MEPhI, Moscow, Russia

Abstract. Various computer-generated holography algorithms for image formation in coherent augmented reality systems based on a holographic waveguide periscope have been considered. A coherent opto-digital system based on a liquid crystal spatial light modulator (SLM) has been built. Experiments on the reconstruction of images from phase computer-generated Fresnel holograms have been conducted. A comparative analysis of the reconstructed images in the system with and without the holographic waveguide has been performed.

Keywords: waveguide holography, phase holograms, computer-generated, Fresnel holograms

Введение. Стремительное развитие технологий дополненной реальности (Augmented Reality, AR) привлекает внимание к исследованию голографических волноводных перископов как основы для разработки наголовных дисплеев [1]. В рамках данной работы было проведено восстановление с компьютерно-синтезированных голограмм сплошных одномерных изображений и изображений 3D-сцен, содержащих три объектные плоскости, в системе с голографическим волноводом и без него.

Материалы и методы. В работе синтезировались компьютерные фазовые голограммы Френеля [2] методом биполярной интенсивности [3], алгоритмом Герчберга — Сэкстона [4] и при помощи нейросетевого метода, основанного на сверточной нейронной сети [5]. Вывод голограмм осуществлялся на фазовый жидкокристаллический ПВМС Santec SLM-200. Источником когерентного излучения выступал лазер с длиной волны $\lambda = 561$ нм. Период дифракционных решеток волновода — 480 нм. Съемка проводилась при значении ISO = 100 и времени экспозиции в 1 секунду.

Изображения восстанавливались при работе в системе деспеклера (вращающегося матового рассеивателя) и мультиплексном выводе на ПВМС голограмм с различными фазовыми распределениями для сглаживания контуров изображений и снижения влияния спекл-шума [6]. При восстановлении изображений с голограмм, синтезированных нейросетевым методом, использовался только деспеклер в виду постоянного фазового распределения синтезированных дифракционных структур.

Оценка и сравнение изображений осуществлялось по значению коэффициента корреляции (КК).

Результаты. На рис. 1 представлена схема экспериментальной установки.

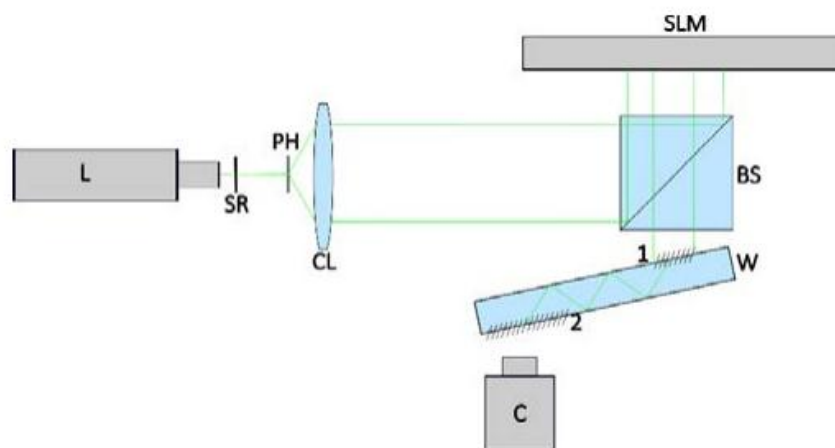


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

L — лазер; SR — деспеклер; PH — пин-холл; L — коллимирующая линза;
BS — светоделительный куб; W — волновод (периоды решеток 1 и 2 равны); C — камера

Для синтеза голограмм использовались сплошные изображения цифр «9», «7» и «3» размера 177×256, 87×128 и 91×128 пикселей соответственно, расположенных на поле размера 1200×1200 пикселей. Расстояние между

плоскостью голограммы и плоскостью изображения составляло 0,45 м, 0,65 м и 0,85 соответственно. Волновод располагался под углом порядка 20° к плоскости ПВМС для пространственного разделения изображений, восстановленных в разных зрачках [1].

При проведении экспериментов по восстановлению плоских изображений в системе без голографического волновода в качестве целевого рассматривалось изображение цифры «3». Диаграмма значений коэффициента корреляции для восстановленного плоского изображения цифры «3», синтезированных различными алгоритмами (БИ — метод биполярной интенсивности, ГС — алгоритм Герчберга — Сэкстона, НС — нейросетевой метод) представлены на рис. 2, а. На рис. 2, б представлены значения КК для восстановленных на различных расстояниях изображений цифр «9», «7» и «3».

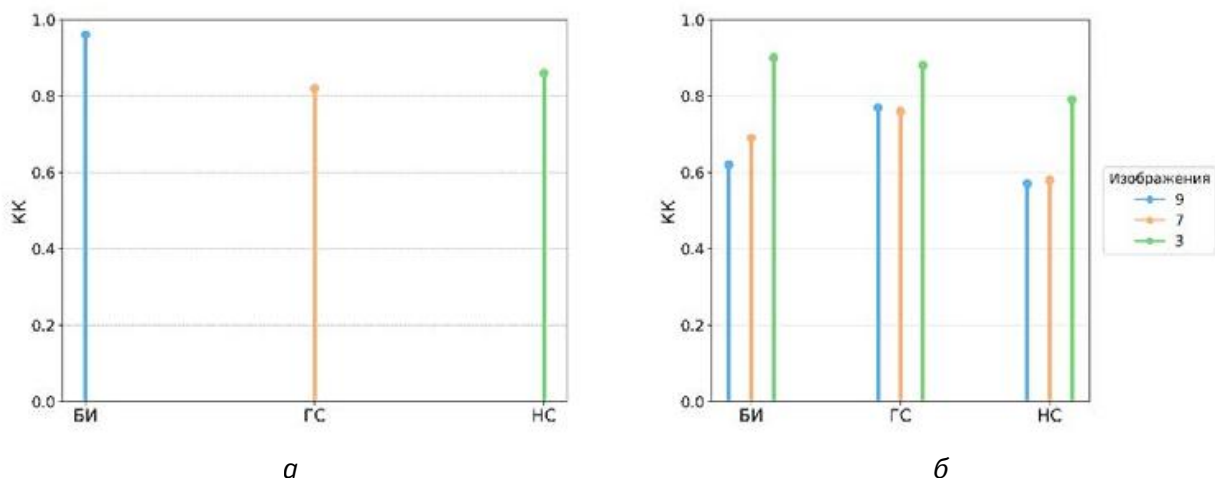


Рис. 2. Диаграмма значений коэффициента корреляции для изображений, восстановленных в системе без голографического волновода:

а — для изображения плоской сцены, содержащей цифру «3»; б — для изображений 3D-сцены, содержащей три объектных плоскости

При восстановлении изображений в системе с волноводом были рассмотрены изображения 3D-сцен, содержащих три объектные плоскости. На рис. 3 представлены результаты восстановленных 3D-сцен.

Восстановление изображений из голограмм, синтезированных методом биполярной интенсивности, показывает сильное проседание целевых изображений по интенсивности, изображения трудноразличимы на фоновом шуме. При восстановлении изображений с голограмм, синтезированных нейронной сетью, на фоне появляется периодическая структура из ярких пикселей, которая накладывается на изображения и ухудшает их качество. Изображения, восстановленные с голограмм, синтезированных алгоритмом Герчберга — Сэкстона, показываются визуально наиболее высокое качество изображений, при этом цифры значительно превосходят фоновый шум по интенсивности. На рис. 4 представлена диаграмма значений коэффициента корреляции восстановленных изображений.

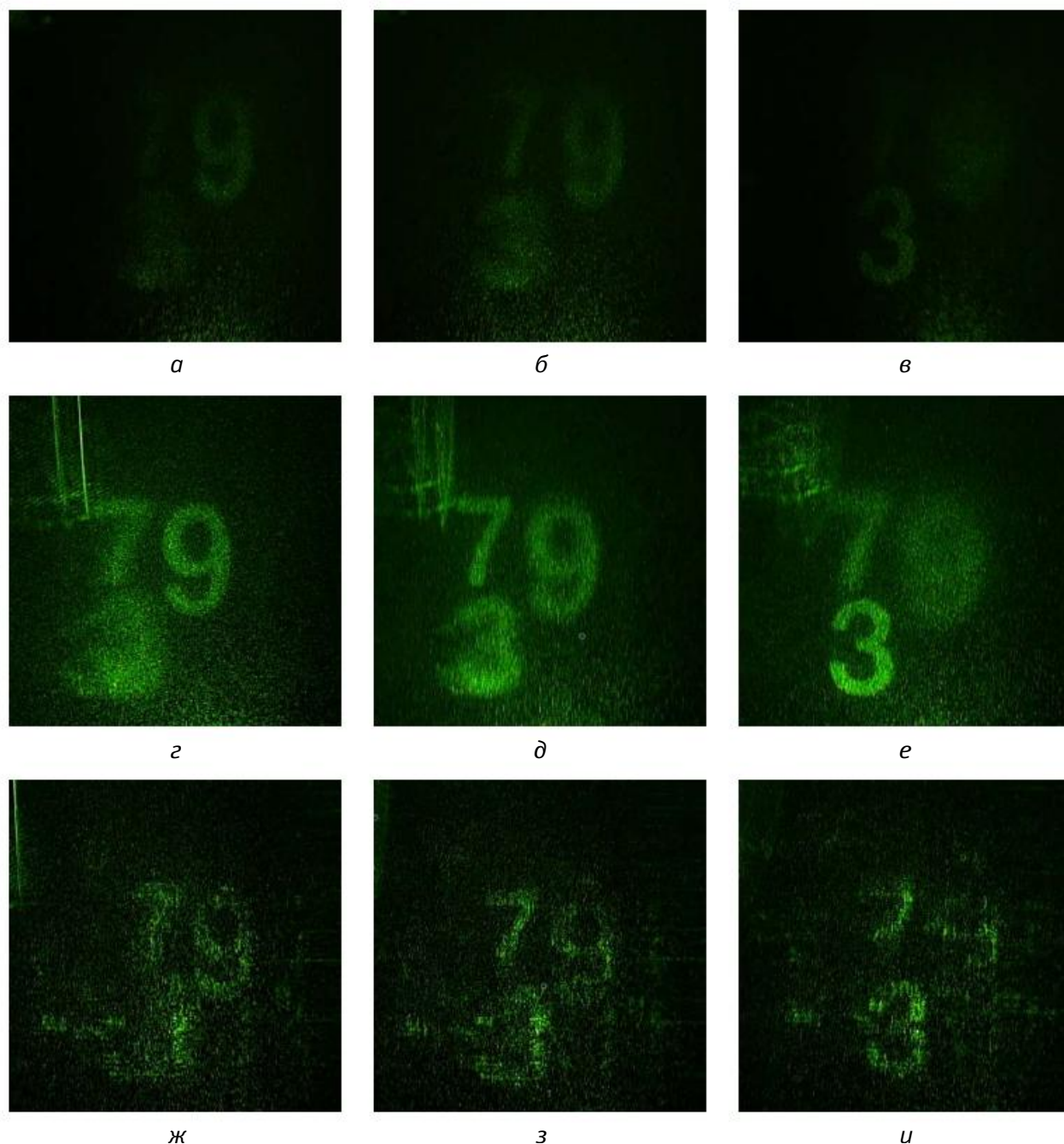


Рис. 3. Восстановленные изображения 3D-сцен в системе с голографическим волноводом: а, б, в — метод биполярной интенсивности; г, д, е — алгоритм Герчберга — Сэкстона; ж, з, и — нейронная сеть

Обсуждение. При восстановлении плоской сцены в системе без голографического волновода все три алгоритма дают сравнимый по коэффициенту корреляции результат. При восстановлении 3D-сцены все алгоритмы дают сравнимый результат при рассмотрении изображения с наибольшим расстоянием между объектной плоскостью и плоскостью голограммы, при рассмотрении двух других плоскостей наилучший результат показывает алгоритм Герчберга — Сэкстона.

При восстановлении изображений 3D-сцен в системе с голографическим волноводом лучше всего себя показывает алгоритм Герчберга — Сэкстона.

Изображения восстанавливаются с высокой яркостью, но присутствует фоновый шум. Метод биполярной интенсивности дает меньшую разницу между яркостью изображений и фоновым шумом, однако изображения восстанавливаются с гладкими контурами и равномерным заполнением. Нейросетевой метод позволяет получить яркие восстановленные изображения, однако целостность изображений нарушается периодической структурой из ярких пикселей. Изображения визуально различимы на зашумленном фоне, однако целостность структуры цифр нарушается. Значения коэффициента корреляции подтверждают эффективность алгоритма Герчберга — Сэкстона для формирования изображений в голографическом волноводе.

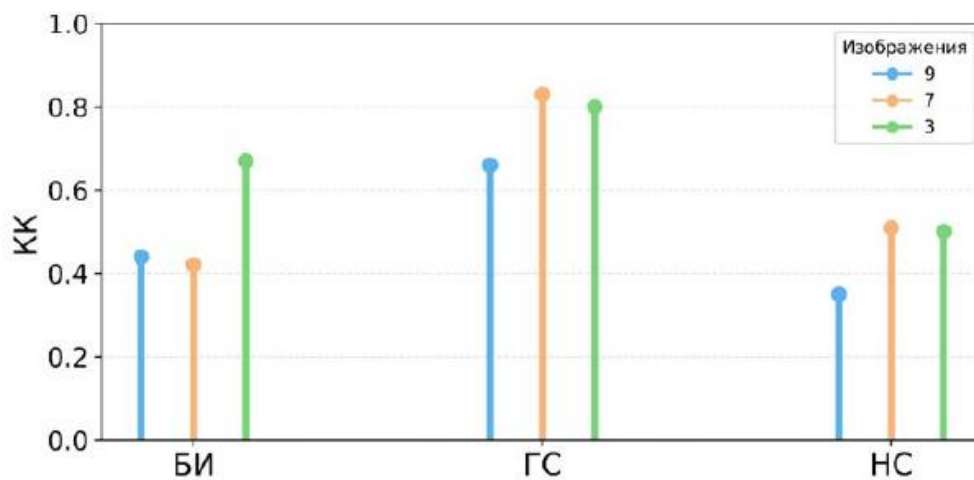


Рис. 4. Диаграмма значений коэффициента корреляции для восстановленных в голографическом волноводе 3D-сцен

Заключение. В ходе работы были проведены эксперименты по восстановлению изображений с компьютерно-синтезированных фазовых голограмм Френеля в оптической системе с голографическим волноводом и без него. Синтез голограмм осуществлялся алгоритмом Герчберга — Сэкстона, методом биполярной интенсивности и нейронной сетью. При формировании изображений в голографическом волноводе наилучший результат показывает алгоритм Герчберга — Сэкстона, что подтверждают значения рассчитанного коэффициента корреляции.

*Работа выполнена при финансовой поддержке
Российского научного фонда (РНФ), грант № 22-79-10340-П.*

*Выражаем благодарность коллективу лаборатории «Голографии
и волноводной оптики» МГТУ им. Н.Э. Баумана за предоставленные образцы.*

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] Путилин А.Н., Морозов А.В., Копенкин С.С., Дубынин С.Е., Бородин Ю.П. Голографические волноводные перископы в дисплеях дополненной реальности. *Оптика и спектроскопия*, 2020, т. 128, вып. 11, с. 1694–1702. <https://doi.org/10.21883/OS.2020.11.50172.93-20>
- [2] Goodman J.W. Introduction to Fourier-optics. Stanford University, Berts & Company Englewood, Colorado, 2005, 491 p.
- [3] Злоказов Е.Ю. Методы и алгоритмы компьютерного синтеза голограммных элементов для получения комплексного импульсного отклика оптических систем обработки информации на основе современных пространственных модуляторов света. *Квантовая электроника*, 2020, т. 50, вып. 7, с. 643–652. <https://doi.org/10.1070/QEL17291>
- [4] Gerchberg W.O., Saxton R.W. A Practical Algorithm for the Determination of Phase from Image and Diffraction Plane Pictures. *Optik (Stuttg)*, 1972, vol. 35, iss. 2, pp. 237–246.
- [5] Rymov D., Svistunov A., Starikov R., Shifrina A., Rodin V., Evtikhiev N., Cheremkhin P., 3D-CGH-Net: Customizable 3D-hologram generation via deep learning. *Optics and Lasers in Engineering*, 2025, vol. 184, art. no. 1. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2024.108645>
- [6] Lee B., Kim D., Lee S. et al. High-contrast, speckle-free, true 3D holography via binary CGH optimization. *Sci. Rep.*, 2022, vol. 12, art. no. 2811. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-06405-2>