

УДК 535.8

Формирование изображений компьютерно-синтезированными голограммами в системе с голографическим волноводом

Гататдинов Тимур Анварович^(*)

gatatdinovtimur@yandex.ru

Злоказов Евгений Юрьевич

ezlokazov@gmail.com

SPIN-код: 1202-6069

НИЯУ МИФИ, Москва, Россия

Аннотация. Проведено исследование процесса восстановления изображений с компьютерно-синтезированных голограмм в голографическом волноводе. Проведены эксперименты по оптическому восстановлению контурных изображений с осевых фазовых голограмм Френеля. Рассмотрены различные методы вывода голограмм на пространственно-временной модулятор света (ПВМС) и оптической схемы: мультиплексный вывод голограмм, использование деспеклера, расположение волновода под углом к плоскости ПВМС, а также их комбинация.

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

Restoration of computer-generated holograms in a system with a holographic waveguide

Gatatdinov Timur Anvarovich^(*)

gatatdinovtimur@yandex.ru

Zlorazov Evgenii Yurievich

ezlokazov@gmail.com

SPIN-code: 1202-6069

MEPhI, Moscow, Russia

Abstract. The work investigated the process of image recovery from computer-generated holograms in a holographic waveguide. Experiments have been conducted on optical reconstruction of contour images from axial phase Fresnel holograms. Various methods of hologram output to a spatial light modulator and an optical circuit are considered: multiplex hologram output, the use of a speckle reducer, the location of the waveguide at an angle to the plane of the modulator, as well as their combination.

Keywords: waveguide holography, phase holograms, computer generating, Fresnel holograms

Введение. Использование дисплеев дополненной реальности (Augmented Reality, AR) является одной из перспективных областей развития технологий ввиду их способности совмещать выводимое изображение с реальным окружением. Это приводит к интересу изучения голографических волноводов как элементов таких систем и волноводных голограмм [1].

Материалы и методы. В работе использовались компьютерно-синтезированные осевые фазовые голограммы Френеля [2]. Синтез голо-

грамм осуществлялся при помощи итеративного метода Герчберга – Сэкстона [3]. Вывод голограмм осуществлялся на фазовый ЖК ПВМС Santec SLM-200, в качестве источника излучения использовался лазер на длине волны $\lambda = 561$ нм. Период дифракционных решеток волновода – 480 нм. Параметры съемки фотокамеры: $f = 11$, ISO=100, время экспозиции — 1 с.

Восстановленные изображения наблюдались при следующих режимах работы схемы: наличие деспеклера (вращающегося матового рассеивателя), последовательный вывод голограмм объектов с различной фазовой маской на экран ПВМС, их комбинация, а также в статичном режиме (отсутствие деспеклера и вывод только одной голограммы).

Оценка и сравнение изображений в различных режимах восстановления осуществлялась при помощи нормального среднеквадратичного отклонения (НСКО), вычисления взаимной корреляции, индекса структурного сходства (SSIM) и пикового отношения сигнал/шум (PSNR).

Результаты. На рис. 1 представлена схема экспериментальной установки.

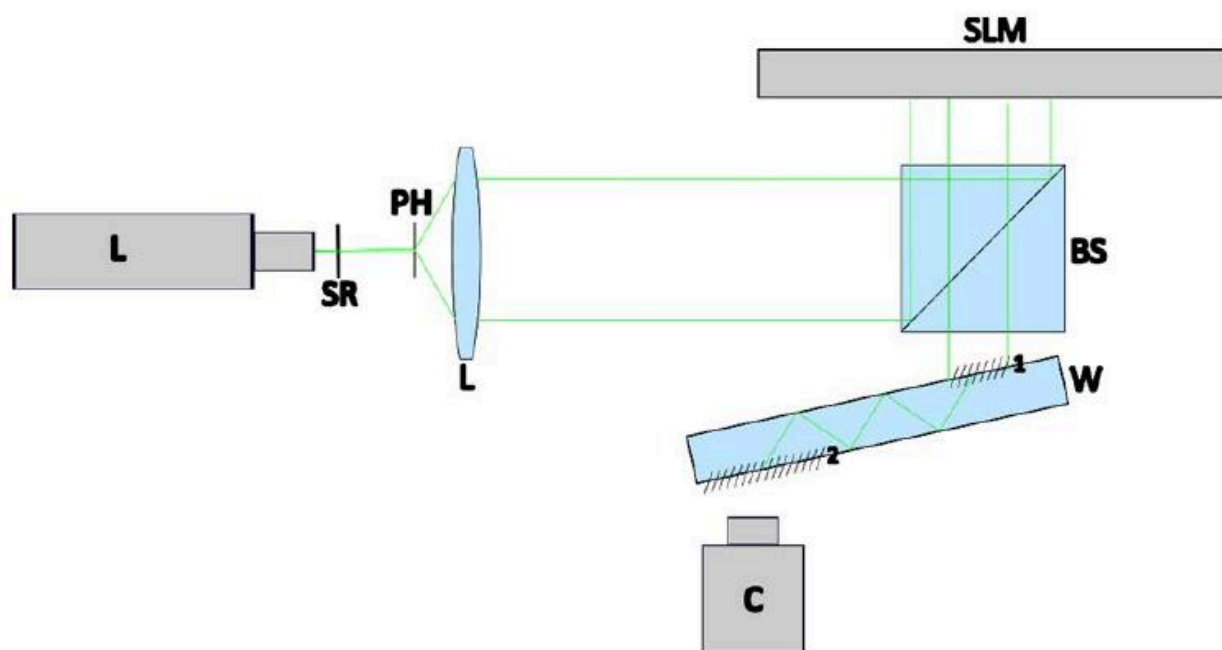


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

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 использовалось контурное изображение цифры «7» размером 335×512 отсчетов на поле 512 × 512 отсчетов. Волновод располагался под углом примерно 30° к плоскости ПВМС. Таким образом, отношение ширины изображения к его высоте составляло примерно 0,65. В мультиплексном режиме голограммы выводились на ПВМС с частотой 10 кадров в секунду.

При первых экспериментах волновод располагался параллельно плоскости ПВМС, однако в таком случае происходило наложение изображений, по-

скольку при каждом отражении внутри волновода изображения смещаются друг относительно друга (рис. 2) [1]. Также при такой конфигурации схемы множится зрачок, появляется яркий нулевой порядок и поле изображения зашумлено спеклами.



Рис. 2. Наложение изображений при параллельном расположении плоскости ПВМС и волновода

Для разрешения данной проблемы волновод был расположен под углом к плоскости ПВМС. Это позволило подавить яркий нулевой порядок дифракции, уменьшить количество спеклов и избавиться от наложения изображений. Полученные изображения при разных конфигурациях системы представлены на рис. 3.

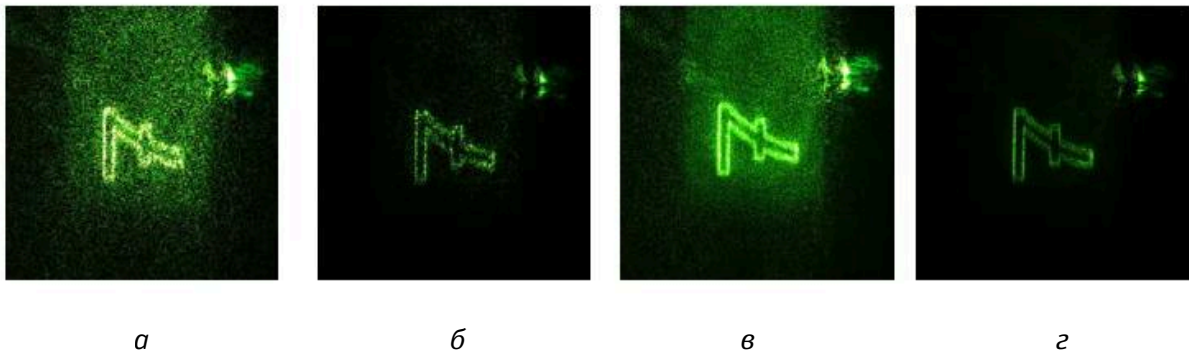


Рис. 3. Восстановленные изображения при различных конфигурациях системы:
а — без модификаций; *б* — использование деспеклера; *в* — мультиплексный вывод голограмм;
г — комбинация деспеклера и мультиплексного вывода голограмм

Однако в такой конфигурации при восстановлении изображения изменялись пропорции. Фактический размер регистрируемого восстановленного изображения составил 133×151 отсчет, и отношение ширины восстановленного изображения к его высоте составило примерно 0,88.

Для анализа точности восстановленных изображений в качестве эталона использовалось исходное цифровое изображение, масштабированное до размера 133×151 . В таблице представлены результаты расчета нормального

среднеквадратичного отклонения (НСКО), взаимной корреляции между восстановленными изображениями и эталоном (МКК), пиковое отношение сигнал/шум (PSNR) и индекс структурного сходства (SSIM).

Значения рассчитанных метрик при различных конфигурациях системы

Конфигурация	НСКО	МКК	PSNR, дБ	SSIM
Без модификаций	0,87	0,47	11,41	0,04
Использование деспеклера	0,84	0,48	11,66	0,09
Мультиплексный вывод голограмм	0,86	0,55	11,48	0,04
Комбинация деспеклера и мультиплексного вывода голограмм	0,78	0,64	12,24	0,13

Значение НСКО [4]:

$$\text{НСКО} = \sqrt{1 - \frac{(\sum_{\xi, \eta=1}^{M, N} F[\xi, \eta] E[\xi, \eta])^2}{(\sum_{\xi, \eta=1}^{M, N} F^2[\xi, \eta])(\sum_{\xi, \eta=1}^{M, N} E^2[\xi, \eta])}}$$

где F и E — исходное и измеренное изображения размера $M \times N$ отсчетов соответственно.

Значение кросс-корреляции:

$$\gamma(u, v) = \frac{\sum_m \sum_n (E[m, n] - \bar{E}_{u, v}) (F[m - u, n - v] - \bar{F})}{\sqrt{\sum_m \sum_n (E[m, n] - \bar{E}_{u, v})^2 \sum_m \sum_n (F[m - u, n - v] - \bar{F})^2}}$$

где F и E — исходное и измеренное изображения размера $M \times N$ отсчетов соответственно.

Пиковое отношение сигнал/шум:

$$\text{PSNR} = 10 \lg_{10} \frac{\text{MAX}^2}{\frac{1}{MN} \sum_{\xi, \eta=1}^{M, N} (F[\xi, \eta] - E[\xi, \eta])^2},$$

где F и E — исходное и измеренное изображения размера $M \times N$ отсчетов соответственно; MAX — максимальное значение в пикселе, в нашем случае $\text{MAX} = 255$.

Для нормировки изображений выравнивались средние значения для исходного и восстановленного изображений.

Вычисление индекса структурного сходства (SSIM) [5]:

$$\text{SSIM} = \frac{(2\mu_F \mu_E + (0,01L)^2)(2\sigma_{FE} + (0,03L)^2)}{(\mu_F^2 + \mu_E^2 + c_1)(\sigma_F^2 + \sigma_E^2 + c_2)},$$

где F и E — исходное и измеренное изображения соответственно; μ_F и μ_E — средние значения F и E ; σ_F^2 и σ_E^2 — значения дисперсий F и E ; σ_{FE} — ковариация F и E , L — динамический диапазон, в нашем случае $L = 255$.

Обсуждение полученных результатов. Расположение плоскости пластинки под углом примерно 30° к плоскости экрана ПВМС позволило снизить влияние нулевого порядка и соседних изображений размноженного зрачка на восстановленное изображение. Последовательный вывод голограмм изображений с различными фазовыми масками на экран ПВМС [6] позволяет снизить влияние спекл-шума на точность восстановления изображений в схеме. Изображение восстанавливается с высокой яркостью и со сглаженными контурами, однако при этом присутствует фоновый шум. Применение деспеклера снижает уровень фонового шума. Положительный эффект от применения обоих методов подтверждается всеми используемыми в анализе метриками: НСКО, МКК, PSNR и SSIM. При анализе полученных значений НСКО и SSIM можно заметить, что эти метрики показывают высокую чувствительность к фоновым спекл-шумам, что особенно проявляется у контурных изображений, имеющих большую площадь фона.

Заключение. В ходе работы были получены изображения, восстановленные с компьютерно-синтезированных осевых фазовых голограмм Френеля при различных конфигурациях оптической системы на основе голограммного волновода с копированием зрачка в горизонтальной плоскости. В качестве методов борьбы со спеклами были рассмотрены использование деспеклера и мультиплексный вывод голограмм на ПВМС. Оба эти метода показали прирост по НСКО, PSNR, максимальному значению корреляции и SSIM. Наиболее эффективный результат показала конфигурация, в которой оба этих метода работают совместно.

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] 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, is. 2, pp. 237–246.
- [4] Fienup J.R. Invariant error metrics for image reconstruction. *Appl Opt.*, 1997, vol. 36, art. no. 8352. <https://doi.org/10.1364/AO.36.008352>
- [5] Wang Z., Bovik A.C., Sheikh H.R., Simoncelli E.P. Image Quality Assessment: from Error Visibility to Structural Similarity. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2004, vol. 13 (4), pp. 600–612.
- [6] Shimobaba T., Makowski M. et al. Lensless zoomable holographic projection using scaled Fresnel diffraction. *Opt. Express*, 2013, vol. 21, no. 21, pp. 25285–25290.