

Численная обработка изображений, получаемых с помощью голографической системы регистрации на основе эффекта геометрической фазы и поляризационной камеры

А. В. Черных, А. С. Езерский, К. А. Герасимов, А. А. Мисюра, Н. В. Петров

Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

С помощью численной обработки изображений, получаемых в системе цифрового голографического микроскопа, в качестве окуляра которого используется линза с эффектом геометрической фазы, решается задача получения фазовых изображений объекта. Доступ к амплитудно-фазовым характеристикам осуществляется с помощью метода параллельного фазового сдвига, в соответствии с которым происходит запись набора цифровых голограмм специализированной поляризационной камерой. Использование линзы с эффектом геометрической фазы позволяет реализовать схему интерферометра общего пути, в которой интерferируют пучки с правой и левой круговыми поляризациями. Благодаря использованию поляризационной камеры, обеспечивается одновременная регистрация распределений интенсивности в четырех проекциях векторов круговой поляризации. Рассматриваемая конфигурация микроскопа предполагает дополнительную компьютерную постобработку. В работе обсуждаются способы получения и численной обработки фазовых изображений микроскопических объектов. Рассмотрены методы коррекции искажений в получаемом фазовом распределении, которые обусловлены кривизной волнового фронта волны, выступающей в качестве опорной, шумами и интерференцией в плоскости регистрации волн паразитных вторичных дифракционных порядков, сформированных бинарной структурой геометрической фазовой линзы.

Ключевые слова: Цифровая голография, линза с эффектом геометрической фазы, метод фазового сдвига, цифровой голографический микроскоп, интерферометр общего пути.

Цитирование: Черных, А. В. Численная обработка изображений, получаемых с помощью голографической системы регистрации на основе эффекта геометрической фазы и поляризационной камеры / А. В. Черных, А. С. Езерский, К. А. Герасимов, А. А. Мисюра, Н. В. Петров // HOLOEXPO 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 393–396.

Введение

Известно, что среди методов анализа и наблюдения состояния трехмерных объектов, в которых допускается только неинвазивная диагностика, одним из самых лучших является количественная фазовая визуализация. Однако, их слабыми сторонами являются: высокая чувствительность к внешним воздействиям и когерентный шум.

В работе обсуждаются физические принципы голографического микроскопа с геометрической фазовой линзой, анализируется поведение волнового фронта (ВФ) после прохождения через линзу. Показано, что геометрическая фазовая линза приводит к формированию сдвиговой интерференционной картины, вызывая перекрытие порядков

дифракции в получаемом изображении. Предлагаются решения вышеобозначенных проблем количественной фазовой визуализации.

1. Регистрация интерференционного поля методом фазовых шагов

В работе рассматривается голографический микроскоп, работающий на основе поляризационной камеры и геометрической фазовой линзы.

Лазерное излучение проходит через призму Глана, затем попадает на образец и направляется на объектив микроскопа, за которым формируется первое изображение. После, пучок проходит через геометрическую фазовую линзу (ГФЛ) и, согласно работе [1], ГФЛ формирует два когерентных пучка: левостороннее и правостороннее циркулярно поляризованные. Один пучок передает изображение на плоскость камеры с массивом микрополяризаторов, а второй выступает в роли опорной волны.

Четыре результирующих распределения интенсивности с соответствующими фазовыми сдвигами одновременно регистрируются в соседних пикселях поляризационного датчика:

$$I_x = |u_+ \cdot \exp(-ix) + u_- \cdot \exp(ix)|^2, \quad (1)$$

где x принимает значения: $0, \pi/4, \pi/2, 3\pi/4$

Используя алгоритм цифровой фазосдвигающей голографии [3], из системы уравнений (1) мы можем получить комплекснозначное поле интерферирующих волн u_+ и u_- :

$$\Delta u = \frac{1}{4} \left((I_{3\pi/2} - I_{\pi/2}) - i(I_0 - I_\pi) \right), \quad (2)$$

$$\Delta \varphi = \text{angle}(\Delta u). \quad (3)$$

Значение $\Delta \varphi$ определяет разницу между фазами φ_+ и φ_- из различных u_+ и u_- ВФ, содержащих свою кривизну. Для ее компенсации необходимо произвести дополнительную обработку, в данной модели считаем, что в расходящемся пучке дифракционное размытие возмущения от объекта не вносит значительного вклада в интерференционную картину. В следующих разделах мы рассмотрим два возможных метода восстановления фазового сдвига.

2. Корректировка фазы методом вычитания вычисленной кривизны ВФ

Данный метод коррекции основан на предположении, что фронты фоновых волн эквивалентны параболическим фронтам, на один из которых накладывается фазовое распределение исследуемого объекта. Если исследуемый образец вносит сдвиг фазы, не превышающей 2π , то можно выполнить фазовую коррекцию, устранив различия в кривизне фоновых ВФ, путем вычитания разности их параболических составляющих (Рис. 1а). В данном измерении индекс структурного сходства (SSIM) составил 0,26281, а пиковое отношение сигнала к шуму (PSNR) – 6,4848.

3. Корректировка фазы объекта методом вычитания измеренной кривизны ВФ

Альтернативный вариант устранения искривления ВФ включает запись дополнительной цифровой голограммы H_{bg} для поля, невозмущенного объектом. В этом случае мы можем получить разности фаз для фоновых ВФ, после вычитания их из разности фаз для поля с объектом остается распределение фазового сдвига от образца (Рис. 1.б). Для этого метода сходство распределения фазы SSIM равно 0,24872, PSNR – 7,3247.

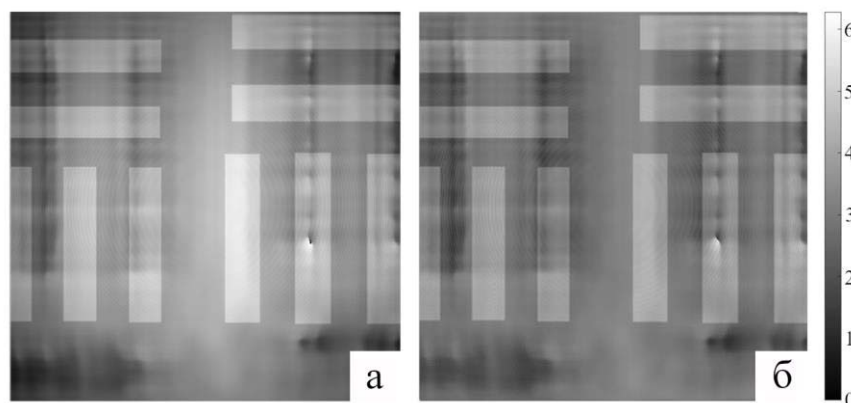


Рис. 1. Восстановленная фаза объекта методами вычитания вычисленной (а) и измеренной (б) кривизны ВФ

4. Экспериментальная проверка результатов

Для извлечения фазового набега от объекта были предложены два подхода: коррекция с вычитанием вычисленной и измеренной кривизны ВФ. При экспериментальной апробации восстановленные распределения фаз не имеют высокой степени контрастности и сильно искажены. Основная причина искажений кроется в образовании вторичных дифракционных порядков от ГФЛ [4].

Заключение

Рассмотренные методы восстановления распределений фазового сдвига дают схожие результаты по SSIM и PSNR. В экспериментальной реализации метод коррекции с вычитанием измеренной кривизны ВФ позволяет восстанавливать распределение фазового сдвига с меньшими искажениями, поскольку частично подавляет радиальные осцилляции фазового сдвига от вторичных дифракционных порядков.

Благодарность

Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации № MD-6101.2021.1.2. This work was supported by President of Russian Federation Grant No. MD-6101.2021.1.2.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Zhang J.** Self-Interference Cancellation: A Comprehensive Review from Circuits and Fields Perspectives / J. Zhang, F. He, W. Li, Y. Li, Q. Wang, S. Ge, J. Xing, H. Liu, Y. Li, J. Meng // *Electronics*. — 2022. — Vol 11. — № 172. — P. 1–16.
- [2] **Awatsuji, Y.** Parallel quasi-phase-shifting digital holography/ Y. Awatsuji, M. Sasada, T. Kubota// *Applied Physics Letters*. — 2004. — Vol 85. — № 6. — P. 1069–1071.
- [3] **Yamaguchi, I.** Phase-shifting digital holography / I. Yamaguchi, T. Zhang // *Optics Letters*. — 1997. — Vol 22. — № 16. — P. 1268–1270.
- [4] **Chernykh, A.** Study on object wavefront sensing in parallel phase-shifting camera with geometric phase lens/ A. Chernykh, A. Ezerskii, A. Georgieva, N. Petrov // *Proceedings of SPIE*. — 2021. — Vol. 11898. — P. 118980X.

Numerical processing of images obtained with the holographic registration system based on the geometric phase effect and the polarization camera

A. V. Chernykh, A. S. Ezerskii, K. A. Gerasimov, A. A. Misura, N. V. Petrov

ITMO University, Saint Petersburg, Russia

Annotation

The problem of obtaining phase distribution by the numerical postprocessing of images obtained in the digital holographic microscope with the geometric phase lens is discussed. Amplitude and phase characteristics are accessed by means of the parallel phase shift digital holography, in accordance with which the set of digital holograms is recorded by a specialized polarization camera. The use of the geometric phase lens makes it possible to implement a common path interferometer scheme, in which beams with right and left circular polarization interfere. By using the polarization camera, simultaneous recording of intensity distributions in four projections of circular polarization states is possible. The considered microscope configuration implies additional post-processing. Methods to correct distortions in the resulting phase distribution caused by the wavefront curvature of the wave, acting as a reference, noise and interference in the registration plane of the parasitic secondary diffraction orders formed by the binary structure of the geometrical phase lens, are considered.

Keywords: Digital holography, Geometric phase lens, Phase shifting digital holography, Digital holographic microscope.