

36. Голографический сканирующий микроскоп: численный эксперимент

М. С. Муравьева¹, Ю. Н. Захаров²

¹ Нижегородский государственный университет имени Н. И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия

² Center for Advanced Biomedical Imaging and Photonics, BIDMC, Harvard University, Boston, USA

На основании теоретического анализа распространения света в голографическом сканирующем микроскопе выполнено численное моделирование процесса записи голограмм и восстановления волнового фронта. Оптимизирован алгоритм восстановления голограмм при наличии регулярных и псевдослучайных паразитных фазовых набегов в сигнальной волне.

Ключевые слова: Цифровая голография, Лазерная сканирующая микроскопия, Численное моделирование.

Цитирование: Муравьева, М. С. Голографический сканирующий микроскоп: численный эксперимент / М. С. Муравьева, Ю. Н. Захаров // HOLOEXPO 2018 : XV международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2018. — С. 156–157.

Введение

Голографический сканирующий микроскоп (ГСМ), построенный на базе коммерческого лазерного сканирующего микроскопа [1] обогащает оптическую микроскопию возможностями количественного фазового имиджинга [2]. Однако в такой схеме фазовая составляющая сигнальной волны искажается сканирующим блоком [1], поэтому требуются специальные алгоритмы обработки сканированных голограмм [3–5]. В данной работе рассматривается алгоритм, моделирующий восстановление кодированной волной для устранения искажений. Проводится численное моделирование формирования голограмм в системе голографической сканирующей микроскопии и анализ алгоритмов цифровой голографической сканирующей микроскопии с целью выбора адекватной процедуры восстановления волнового фронта.

1. Голографическая сканирующая микроскопия как голография с кодированной опорной волной

Голограмма, формируемая детектором (ФЭУ или фотодиодом) голографического сканирующего микроскопа при поточечном сканировании объекта с амплитудным коэффициентом отражения r_{kl} (k, l — дискретные координаты области сканирования) и плоской опорной волной с амплитудой A описывается выражением [3]

$$H_{kl} \approx A^2 + q^2 r_{kl}^2 + A q r_{kl} \left[\exp(i\psi_{kl}) \exp\left(i \left[2\phi_{kl} + \right. \right. \right.$$

$$\left. \left. + \frac{2\pi}{\lambda}(F - z_2 - 2z_3) \sin^2 \theta_{kl} \right] \right] + \text{с.с.} \quad (1)$$

Фазовый набег сигнальной волны определяется объектом (ψ_{kl}), а также получает дополнительные искажения в оптическом тракте, главным образом, в сканирующем модуле.

$$\gamma_{kl} = 2\phi_{kl} + 2\pi/\lambda(F - z_2 - 2z_3) \sin^2 \theta_{kl}. \quad (2)$$

Для каждого пиксела сканирования k, l : $\sin \theta_{kl}$ — направляющий синус сканирующего объекта пучка, ϕ_{kl} — дополнительные фазовые искажения, вызываемые положениями гальванических зеркал. F — фокусное расстояние объектива, z_2, z_3 характеризуются конструкцией микроскопа, q определяется амплитудой сканирующего объекта пучка и потерями в оптическом тракте микроскопа.

Но (1) можно представить как голограмму объекта $r_{kl} \exp(i\psi_{kl})$, записанного с опорной волной $A \exp(i\gamma_k)$. Тогда можно получить правильные коэффициент отражения и фазовый портрет объекта, восстанавливая H_{kl} такой «кодированной» опорной волной. $A \exp(i\gamma_k)$ может быть получена из голограммы плоского зеркала, записанной в той же схеме.

Если выбрать диапазон углов сканирования θ_{kl} таким образом, чтобы их пространственные частоты превышали максимальную пространственную частоту объекта, процедура восстановления становится аналогичной хорошо известному восстановлению внеосевой голограммы.

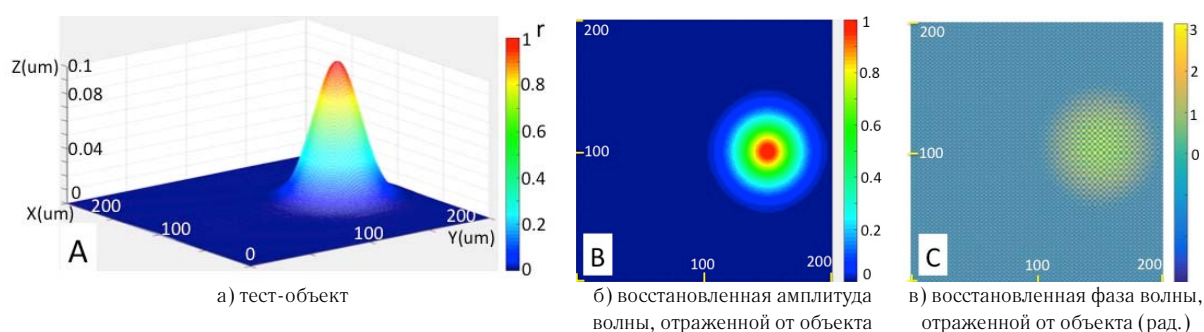


Рис. 1. Результаты численного эксперимента ГСМ

2. Численный эксперимент записи голограммы ГСМ и ее восстановления

Чтобы проверить работоспособность предлагаемого алгоритма, в среде MatLab согласно (1) было смоделировано формирование голограмм ГСМ плоского зеркала и объекта в виде двумерного Гауссова профиля высотой 100 нм с коэффициентом отражения r , изменяющегося также по Гауссовому закону (рис. 1а). Для восстановления волнового фронта, «отраженного» от объекта, выполняются следующие действия:

- 1) преобразование Фурье голограммы зеркала;
- 2) пространственная фильтрация положительных частот (зануление нулевого порядка и отрицательных частот);
- 3) обратное преобразование Фурье.

В результате мы имеем восстанавливающую волну $A \exp(i\gamma_k)$. Далее:

- 4) умножение голограммы объекта на $A \exp(i\gamma_k)$;
- 5) преобразование Фурье;
- 6) фильтрация нулевого порядка;
- 7) обратное преобразование Фурье.

Результат восстановленного изображения показан на рис. 1б (амплитуда) и рис. 1в (фаза в радианах).

Заключение

Результаты численного эксперимента по записи голограмм в системе сканирующей микроскопии и восстановлению алгоритмами, описанными ранее [3–5] и предлагаемым в данной работе, показали корректное восстановление волнового фронта. Описанный здесь алгоритм более устойчив, чем «сверточный» [3] и не требует помимо голограммы еще и дополнительной записи интенсивности объектной волны, как [4, 5].

Список источников

- [1] **Захаров, Ю. Н.** Оптическая сканирующая голография и голографическая сканирующая микроскопия / Ю. Н. Захаров, В. В. Дуденкова, М. С. Муравьева // Труды II-й Международной конференции «ГолоЭкспо–2014». Голография. Наука и практика. — М.: 2014. — С. 124–131.
- [2] **Zakharov, Yu.** Possibilities of holographic techniques in laser scanning microscopy / Yu. Zakharov, M. Muravyeva, V. Dudenkova, I. Mukhina, I. Meglinski // Proc. SPIE. — 2015. — Vol. 9540. — P. 95400P.
- [3] **Zakharov, Y.** Features of reconstruction process in holographic scanning microscopy / Y. Zakharov, M. Muravyeva, L. Qiu, and L. Perelman // Digital Holography & 3-D Imaging Meeting: OSA Technical Digest. — Optical Society of America. — 2015. — P. DT4A.3.
- [4] **Zakharov, Y.** Refractive Index Reconstruction in Confocal Holographic Scanning Microscopy / Y. Zakharov, L. Qiu, U. Khan, E. Vitkin, I. Itzkan, L. T. Perelman // Imaging and Applied Optics 2016: OSA Technical Digest. — Optical Society of America, 2016. — Paper JW4A.7.
- [5] **Захаров, Ю. Н.** Техника, алгоритмы и особенности широкопольной и сканирующей голографической микроскопии / Ю. Н. Захаров. // Голография. Наука и практика: 13-я междунар. конф. «ГолоЭкспо 2016» — М.: 2016. — С. 75–77.

Holographic scanning microscope: computer simulation

M. S. Muravyeva¹, Y. N. Zakharov²

¹ N. I. Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, Russia

² Center for Advanced Biomedical Imaging and Photonics, BIDMC, Harvard University, Boston, USA

On the base of theoretical analysis of light propagation through holographic scanning microscope we made simulation of hologram recording and wave front reconstruction. Hologram reconstruction algorithm is optimized in presence of regular and pseudorandom signal wave phase incursion.

Keywords: Digital holography, Laser scanning microscopy, Computer simulation.