

09.6

Обработка классических голографических интерферограмм алгоритмами восстановления цифровых голограмм

© А.В. Белашов^{1,2}, Н.В. Петров², И.В. Семенова¹

¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург

² Национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики

E-mail: Irina.Semenova@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 21 ноября 2014 г.

Обоснована возможность применения алгоритмов цифровой голографии для обработки голографических интерферограмм в полосах конечной ширины, записанных и восстановленных классическим оптическим методом. Показано, что применение таких алгоритмов позволяет существенно упростить процедуру обработки. На примере голографической интерферограммы объемной нелинейной волны (солитона) деформации проведено сравнение результатов, полученных обоими методами; продемонстрировано их хорошее совпадение.

В связи с быстрым развитием цифровой регистрирующей техники в последние годы широкое распространение получили методы цифровой голографии [1,2]. Однако эти методы все еще имеют некоторые ограничения, прежде всего связанные с разрешающей способностью и быстродействием современных цифровых камер. И если ограничение разрешающей способности можно легко преодолеть путем использования стандартного коммерческого сканера в качестве системы регистрации [3], то повышение скорости регистрации для исследования быстропротекающих процессов приводит к необходимости использования специализированных высокоскоростных камер [4,5]. Либо в качестве альтернативы могут быть применены методы классической голографической интерферометрии с регистрацией на фотоматериалах и последующим оптическим восстановлением.

Метод двухэкспозиционной голографической интерферометрии предполагает последовательную регистрацию двух голограмм исследу-

емого объекта в двух состояниях на одном и том же месте высокоразрешающего фотоматериала. В методе полос конечной ширины между экспозициями слегка изменяется угол между опорным и предметным пучками, например поворотом клина в предметном пучке. При восстановлении это приводит к появлению несущих полос, отклонение которых от прямой обусловлено фазовым набегом, вызванным возмущением объекта, причем отклонение на ширину несущей полосы ($\Delta K = 1$) соответствует фазовому набегу 2π .

Зачастую из-за несовершенства оптической системы и искажений, вносимых изучаемым объектом, на интерферограмме появляются различные дефекты, прежде всего разрывы несущих полос. Наличие этих дефектов значительно усложняет реализацию автоматического отслеживания несущей полосы и измерение ее отклонения с помощью известных алгоритмов обработки.

Задача данной работы заключалась в разработке надежной и достаточно простой методики автоматизированной обработки классических голографических интерферограмм. Покажем, что такая обработка может быть осуществлена с помощью хорошо развитых в настоящее время алгоритмов восстановления внесосевого цифрового голограмм. Как известно, голографическая интерферограмма в полосах конечной ширины представляет собой результат интерференции двух предметных волн с фазовыми компонентами φ_1 и φ_2 под некоторым углом, добавляющим к одной из предметных волн плоскую наклонную фазу γ . Разность их фазовых распределений $\varepsilon = \varphi_1 - \varphi_2$ соответствует изменениям, произошедшим с исследуемым объектом между экспозициями. Интерференция двух предметных волн $A \exp(i\varphi_1)$ и $B \exp(i(\varphi_2 + \gamma))$ описывается уравнением

$$\begin{aligned} I &= |A \exp(i\varphi_1) + B \exp(i(\varphi_2 + \gamma))|^2 \\ &= A^2 + B^2 + 2AB \cos(\varphi_1 - (\varphi_2 + \gamma)). \end{aligned} \quad (1)$$

При этом интерференционный член представляет собой $\cos(\varphi_1 - (\varphi_2 + \gamma))$. Однако эту интерференционную картину можно интерпретировать и другим образом. Ее можно представить как голограмму, полученную в результате взаимодействия предметной волны, имеющей фазу возмущения исследуемого объекта ε , и плоской опорной волны, имеющей фазу γ_0 , при угле θ между ними. В данном

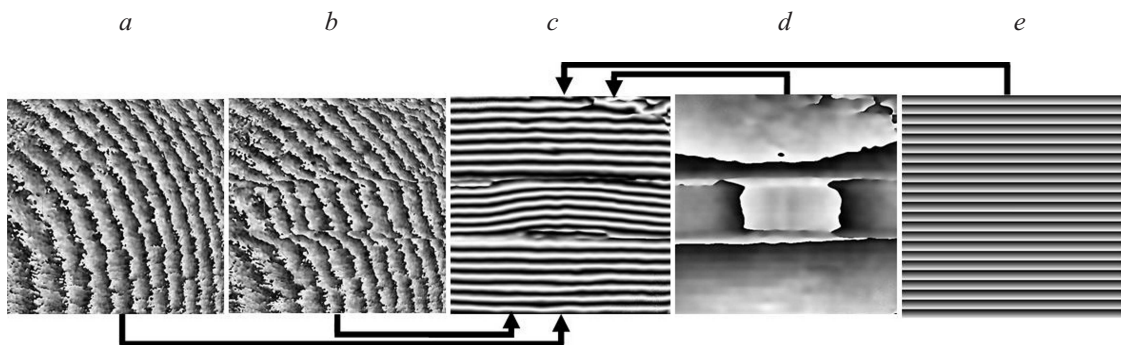


Рис. 1. Результат моделирования процессов образования голографических интерферограмм ($a-c$) и внеосевых цифровых голограмм ($c-e$).

случае интерференционный член также описывается выражением $\cos(\varepsilon - \gamma_0) = \cos(\varphi_1 - \varphi_2 - \gamma_0)$. Данное предположение было проверено посредством численного моделирования картины интерференции под углом θ двух предметных волн, соответствующих наличию (рис. 1, *a*) и отсутствию (рис. 1, *b*) возмущения, а также цифровой голограммы с предметной волной, несущей информацию о возмущении объекта (рис. 1, *d*) и опорной волной, наклоненной также на угол θ (рис. 1, *e*). Видно, что данные подходы приводят к одинаковому распределению интенсивности (рис. 1, *c*).

Тогда, применяя к полученной интерферограмме алгоритм восстановления внеосевых цифровых голограмм и считая угол между предметной и опорной волнами равным θ , можно легко получить массив значений фазового запаздывания, вызванного изменениями, произошедшими с исследуемым объектом. Причем данный угол может быть как измерен в ходе эксперимента, так и рассчитан исходя из параметров интерференционных полос в невозмущенной области [6]. Таким образом, в сущности, разница между классической голографической интерферометрией и внеосевой цифровой голографией сводится к перегруппировке фазовых компонент в слагаемом, описывающем интерференцию волн. Это равнозначно переобозначению понятий опорной и предметной волн.

На сегодняшний день существует довольно много алгоритмов восстановления внеосевых цифровых голограмм. Однако в нашем случае ввиду большого количества разрывов несущих полос следует (пример разрывов на вставке на рис. 2, *a*) использовать алгоритм, устойчивый к подобным дефектам. С этой точки зрения алгоритм [7] восстановления фазы обладает значительными преимуществами. Он основан на предположении, что амплитуда предметной и опорной волн, а также фаза предметной волны меняются намного медленнее, чем фаза плоской опорной волны и зарегистрированная интенсивность. Данное предположение справедливо в подавляющем большинстве случаев в связи с тем, что опорная волна падает на регистрирующий материал не перпендикулярно, а под некоторым углом. При этом ее фазовый фронт может быть легко смоделирован из априорной информации об угле θ . Далее вокруг каждого пикселя рассматривается небольшая квадратная область размером $N \times N$ пикселей, где медленно меняющиеся параметры считаются постоянными. Это позволяет составить систему из $M = N^2$ переопределенных уравнений с тремя неизвестными

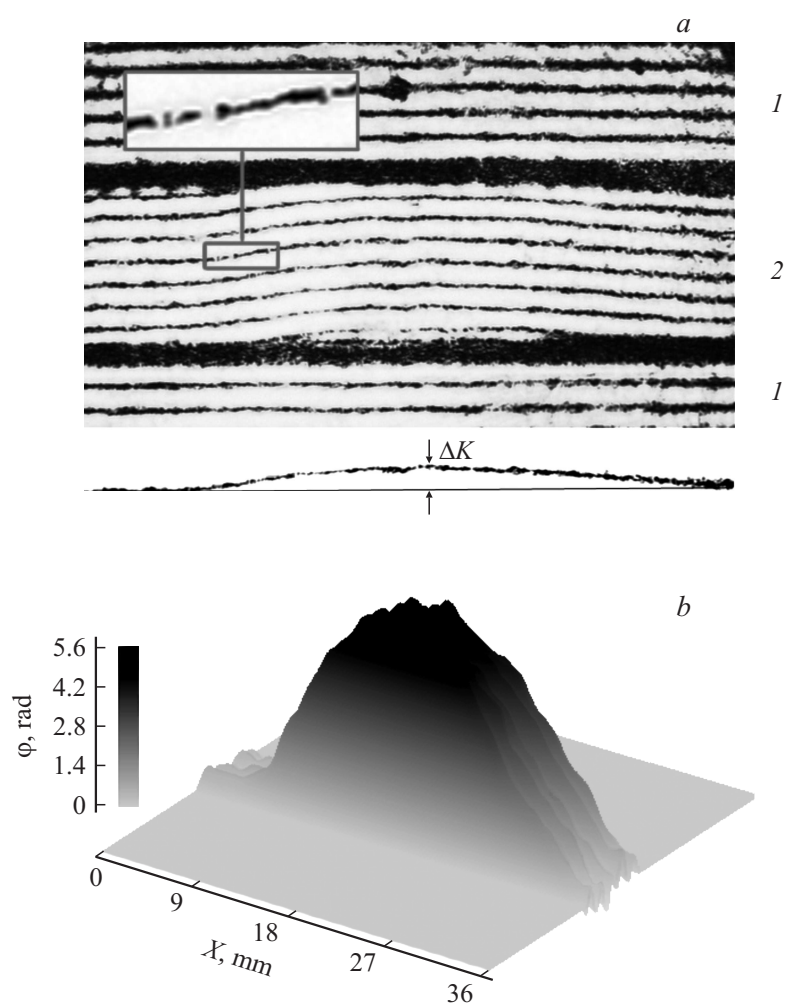


Рис. 2. Голографическая интерферограмма солитона деформации в однородном волноводе из ПС (а), и результат ее обработки алгоритмом восстановления цифровых голограмм [7] (б). а — цифрами обозначены волновод из ПС (2) и окружающий воздух (1), на сноске под интерферограммой приведена форма одной интерференционной полосы.

величинами: амплитудами предметной и опорной волн и фазой предметной волны. В результате решения этой системы уравнений могут быть получены значения искомым величин. При этом предположение о медленно меняющейся фазе предметной волны позволяет получить достаточно гладкое фазовое распределение возмущения даже при наличии большого количества мелких разрывов несущих полос. А степень сглаживания определяется размером области, в которой происходит построение переопределенной системы уравнений [8].

Данный алгоритм был применен для обработки голографических интерферограмм объемного солитона деформации в твердотельном волноводе из полистирола (ПС). Исходная интерферограмма приведена на рис. 2, *a*. В классическом случае обработка такой интерферограммы заключается в измерении смещений интерференционных полос. В нашем случае после применения алгоритма [7] был получен массив значений фазового запаздывания (рис. 2, *b*).

Видно, что форма кривой, характеризующей изменение фазы, совпадает с искривлением несущей полосы на интерферограмме, записанной по методу двухэкспозиционной голографической интерферометрии, при этом на обработанном изображении не наблюдается разрывов и дефектов, присутствующих на интерферограмме.

Амплитуда наблюдаемого солитона деформации может быть рассчитана из сдвига несущих полос по формуле [9]:

$$A = \frac{\Delta K \lambda}{h(n_1 - 1)(1 - \nu)}, \quad (2)$$

где ΔK — сдвиг несущей полосы на интерферограмме, λ — длина волны регистрирующего излучения ($0.694 \mu\text{m}$); n_1 — показатель преломления материала, из которого выполнен волновод (1.54); h — толщина волновода вдоль направления распространения детектирующего излучения (10 mm), ν — коэффициент Пуассона (для ПС $\nu = 0.34$). Поскольку $\Delta K = \varphi/2\pi$ (где φ — фаза), получим

$$A = \frac{\varphi \lambda}{2\pi h(n_1 - 1)(1 - \nu)}. \quad (3)$$

В результате обработки интерферограммы рис. 2, *a* были получены значения максимальной амплитуды солитона $A_{\text{max}} = 1.82 \cdot 10^{-4}$, его ширины $L = 33.0 \text{ mm}$ и ширины на полувисоте $L_{\text{FWHM}} = 17.8 \text{ mm}$.

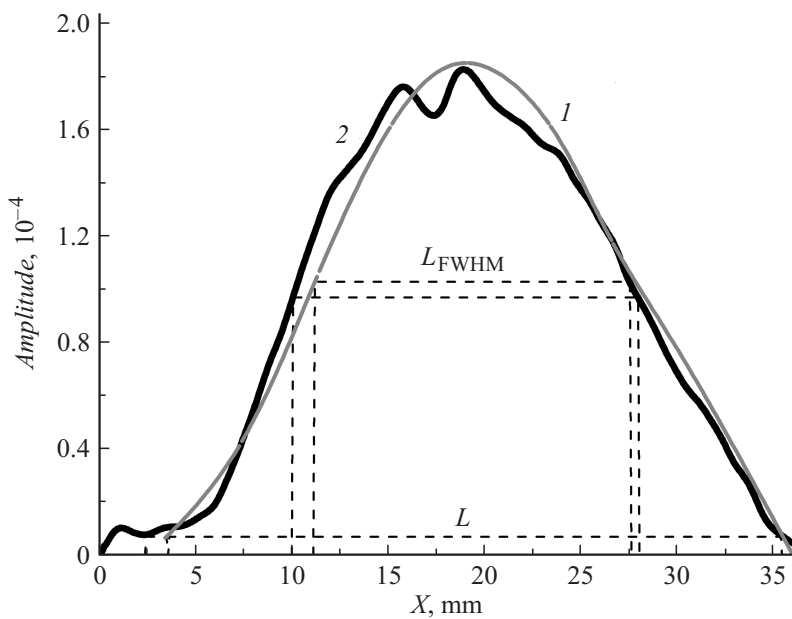


Рис. 3. Форма солитона деформации в твердотельном волноводе из ПС, полученная при обработке интерферограммы рис. 2, а: 1 — классическим методом (построена по 7 точкам и сглажена β -сплайном), 2 — алгоритмом [7] восстановления цифровых голограмм. Пунктирными линиями обозначены ширина солитона (L) и ширина на полувысоте (L_{FWHM}).

На рис. 3 приведены кривые, характеризующие форму солитона продольной деформации, полученные классическим методом (с построением по дискретным точкам и сглаживанием β -сплайном) и с использованием предлагаемого метода. Видно, что кривые практически совпадают. Расхождение в длине солитона (L) можно объяснить достаточно большой погрешностью измерения смещений полосы классическим методом при таких пологих фронтах уединенной волны.

Таким образом, показано, что алгоритмы восстановления цифровых голограмм могут быть применены для обработки голографических интерферограмм в полосах конечной ширины, записанных и восстановленных классическим методом.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда в рамках гранта № 14-12-00342.

Н.В. Петров благодарит за поддержку Министерство образования и науки РФ, проект № 2014/190 на выполнение государственных работ в сфере научной деятельности в рамках базовой части государственного задания.

Список литературы

- [1] Verrier N., Atlan M. // *Appl. Opt.* 2011. V. 50. P. H136–H146.
- [2] Tahara T., Awatsuji Y., Shimozato Y., Kakue T., Nishio K., Ura S., Kubota T., Matoba O. // *Opt. Lett.* 2011. V. 36. P. 3254–3256.
- [3] Shimobaba T., Yamanashi H., Kakue T., Oikawa M., Okada N., Endo Y., Hirayama R., Masuda N., Ito T. // *Sci. Rep.* 2013. V. 3. P. 2664.
- [4] Karray M., Poilane C., Mounier D., Gargoury M., Picart P. // *Proc. SPIE.* 2012. V. 8413. P. 841 311.
- [5] Leclercq M., Karray M., Isnard V., Gautier F., Picart P. // *Appl. Opt.* 2013. V. 52. P. A136–A146.
- [6] Belashov A.V., Petrov N.V., Semenova I.V., Vasyutinskii O.S. // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2014. V. 536. P. 012003.
- [7] Liebling M., Blu T., Unser M. // *JOSA. A.* 2004. V. 21. N 3. P. 367–377.
- [8] Belashov A.V., Petrov N.V., Semenova I.V. // *Opt. Express.* 2014. V. 22. P. 28363–28376.
- [9] Dreiden G.V., Khusnutdinova K.R., Samsonov A.M., Semenova I.V. // *Strain.* 2010. V. 46. N 6. P. 589–598.