

Двухэкспозиционная голографическая интерферометрия с записью серии наложенных голограмм в одной регистрирующей среде

И.А.Лявшук, А.М.Ляликов

Предложен способ записи серии двухэкспозиционных голограмм в одной регистрирующей среде за счет ее разворота между циклами записи с последующим восстановлением интерференционных картин, характеризующих изменение состояния объекта во времени. Рассмотрены условия получения интерференционных картин в полосах как с бесконечной, так и с конечной шириной. Приведены результаты экспериментов при записи серии из девяти двухэкспозиционных голограмм на голографической пленке ФГ-690.

Ключевые слова: голографическая интерферометрия, интерференционная картина, компенсация aberrаций, разворот регистрирующей среды.

1. Введение

Голографическая интерферометрия в отличие от классической двухлучевой имеет ряд неоспоримых преимуществ, особенно при изучении быстротекающих процессов в условиях сильных aberrаций оптической системы, формирующей интерферограммы. К таким преимуществам следует отнести, в первую очередь, исключение aberrаций, вносимых некачественными оптическими элементами. Исключение aberrаций в голографической интерферометрии реализуется обычно на стадии восстановления интерференционной картины либо с помощью эталонной голограммы, зарегистрированной без исследуемого объекта, либо при двухэкспозиционной записи голограммы [1–3]. Двухэкспозиционная голографическая интерферометрия не требует использования высокоточных держателей в отличие от метода совмещения эталонной и объектной голограмм. В последнем случае для полного исключения aberrаций необходимо совмещение эталонной и объектной голограмм с точностью до 3–5 мкм [1].

При исследовании быстротекающих процессов методами голографической интерферометрии обычно требуется регистрация серии восстановленных интерференционных картин, свободных от aberrаций и визуализирующих параметры исследуемого объекта в различные моменты времени. Такой вариант голографической интерферометрии может быть реализован с использованием как записи каждой голограммы в отдельных регистрирующих средах [3], так и записи серии наложенных голограмм в одной регистрирующей среде [4–8]. Во втором случае для кодирования каждой голограммы по несущей частоте обычно используется разворот опорного пучка.

И.А.Лявшук, А.М.Ляликов. Гродненский государственный университет им. Янки Купалы, Белоруссия, 230023 Гродно, ул. Ожешко, 22; e-mail: lyalikov@inbox.ru

Поступила в редакцию 13 сентября 2005 г., после доработки – 23 ноября 2005 г.

Восстановление серии интерференционных картин с наложенных голограмм в одной регистрирующей среде, визуализирующих состояние исследуемого объекта в определенные промежутки времени, осуществляется в определенном устройстве двумя когерентными пучками с выделением волн, дифрагировавших на соответствующих голографических структурах [7, 8]. Применение такого устройства восстановления интерференционных картин значительно усложняет техническую реализацию эксперимента. Для восстановления интерференционной картины с двукратно экспонированной голограммы не нужны ни два когерентных пучка, ни когерентное освещение [1, 2], что делает данный способ наиболее привлекательным для исследования различных объектов и процессов.

Целью настоящей статьи является разработка более эффективного способа записи серии двухэкспозиционных голограмм в одной и той же регистрирующей среде за счет ее вращения при переходе от одного цикла записи к другому, который позволяет на стадии восстановления интерференционных картин применять наиболее простую оптическую схему с некогерентным источником освещения. В отличие от способов записи, рассмотренных в более ранних работах, данный способ не требует при восстановлении интерференционных картин использования двух пучков когерентного света.

2. Запись голограмм

На рис.1 приведена оптическая схема записи голограмм. Излучение гелий-неонового лазера 1 поворотным зеркалом 2 направлялось в телескопическую систему 3, 5 и вводилось в интерферометр типа Маха–Цендера, образованного светоделителями 6, 10 и зеркалами 7, 9. Для улучшения качества лазерного пучка в задней фокальной плоскости микрообъектива 3 устанавливалась диафрагма 4 с отверстием ~ 10 мкм. Плоскость регистрирующей среды (фотоэмульсии) 12 оптически сопрягалась объективом 11 с исследуемым объектом 8. Систему координат $ху$ выберем так, чтобы оси $х$ и $у$ лежали в плоскости регистрирующей среды 12, а ось z совпадала с направлением распространения объектного пучка.

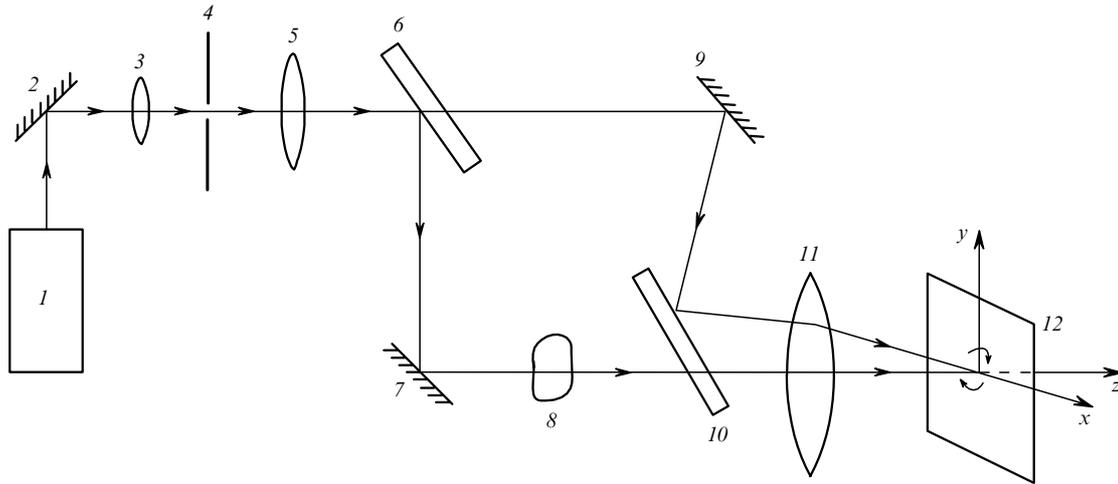


Рис.1. Оптическая схема записи голограмм:

1 – гелий-неоновый лазер; 2 – поворотное зеркало; 3, 5 – объективы телескопической системы; 4 – диафрагма; 6, 10 – светоделители; 7, 9 – зеркала; 11 – объектив; 12 – регистрирующая среда (фотопластина).

При реализации обычного метода двухэкспозиционной голографической интерферометрии регистрирующая среда 12 последовательно экспонируется дважды: один раз без исследуемого объекта и второй раз – с объектом 8. При обеих экспозициях используется или одинаковый опорный пучок без изменения направления освещения для получения восстановленной интерференционной картины в полосах бесконечной ширины, или пучок с изменением направления освещения для получения картины в полосах конечной ширины. В этом случае распределение освещенности в голографических структурах, полученных в результате первой и второй экспозиций (структуры первой и второй экспозиций), можно представить соответственно в виде

$$I'(x, y) = a_1^2 + a_2^2 + 2a_1^2 a_2^2 \times \cos[2\pi(\xi_0 x + \eta_0 y) + \varepsilon(x, y)], \quad (1)$$

$$I''(x, y) = a_1^2 + a_2^2 + 2a_1^2 a_2^2 \times \cos[2\pi(\xi x + \eta y) + \varepsilon(x, y) + \varphi(x, y)], \quad (2)$$

где a_1 и a_2 – действительные амплитуды объектного и опорного пучков; ξ_0, η_0 и ξ, η – компоненты пространственных частот полос голографических структур первой и второй экспозиций, характеризующие период и определяемые ориентацией опорного пучка по отношению к объектному пучку [5]; $\varepsilon(x, y)$ – искажения фазы аберрациями оптической системы записи голограмм; $\varphi(x, y)$ – изменения фазы исследуемым объектом в момент регистрации. Амплитудное пропускание такой двухэкспозиционной голограммы пропорционально $[I'(x, y) + I''(x, y)]^{-\gamma/2}$, где γ – коэффициент контрастности фотоэмульсии.

Предположим, что в одной регистрирующей среде необходимо записать N двухэкспозиционных голограмм, характеризующих изменения фазы исследуемым объектом в определенные моменты времени. Для кодирования каждой из этих голограмм по несущей частоте будем использовать разворот регистрирующей среды относительно оси z на фиксированный угол $\Delta\alpha$. На первом этапе

реализации способа записи без исследуемого объекта экспонируются N опорных голографических структур. При этом, начиная с записи второй голографической структуры, регистрирующая среда перед экспонированием разворачивается на угол $\Delta\alpha$. После записи последней (N -й) голографической структуры каждая из структур будет развернута на угол $\alpha_l = \Delta\alpha(N - l)$ по отношению к первоначальному ее положению, соответствующему записи первой структуры, и распределение освещенности, накопленной в регистрирующей среде при наложении N опорных голографических структур, можно представить в виде

$$I'_z(x, y) = N(a_1^2 + a_2^2) + 2Na_1 a_2 \times \sum_{l=1}^N \cos[2\pi(\xi_{0l} x + \eta_{0l} y) + \varepsilon_l(x, y)], \quad (3)$$

где ξ_{0l}, η_{0l} – компоненты пространственной частоты полос l -й опорной голографической структуры, характеризующие ее ориентацию к моменту записи последней (N -й) структуры за счет разворота регистрирующей среды на угол α_l . Вид функций $\varepsilon_l(x, y)$ будет зависеть от угла α_l , а преобразование функции $\varepsilon(x, y)$ может быть осуществлено по формулам преобразования при повороте системы координат на угол α_l [9].

Очевидно, что для исключения наложения голографических структур первых и последних экспозиций, приводящего к появлению «паразитной» муаровой картины, максимальные величины $\Delta\alpha$ и N определяются из условия $\alpha_l < 180^\circ$.

После последней экспозиции N -й голографической структуры регистрирующая среда может или оставаться в этом положении, или возвращаться в первоначальное. Здесь для двухэкспозиционной голографической интерферометрии не имеет принципиального значения, какая из объектных голографических структур накладывается на зарегистрированную опорную структуру.

На втором этапе вместе с исследуемым объектом экспонируется N объектных голографических структур. При этом, как и при регистрации опорных структур, регистрирующая среда, начиная с записи второй структуры, разворачивается перед экспонированием на фиксирован-

ный угол $\Delta\alpha$. При такой регистрации каждая объектная голографическая структура, характеризующая состояние объекта в момент записи, будет накладываться на свою, записанную на первом этапе, опорную структуру. В этом случае распределение освещенности, накопленной в регистрирующей среде при наложении N объектных голографических структур, можно представить в виде

$$I''_{\Sigma}(x, y) = N(a_1^2 + a_2^2) + 2Na_1a_2 \times \sum_{l=1}^N \cos[2\pi(\xi_l x + \eta_l y) + \varepsilon_l(x, y) + \varphi_{ll}(x, y)], \quad (4)$$

где ξ_l, η_l – компоненты пространственной частоты полос l -й объектной голографической структуры, характеризующие ее ориентацию к моменту записи последней (N -й) структуры. Функция $\varphi_{ll}(x, y)$ описывает изменения фазы исследуемым объектом в момент записи l -й голографической структуры. В отличие от $\varepsilon_l(x, y)$ эта функция будет зависеть не только от угла α_l разворота регистрирующей среды, но и от состояния исследуемого объекта в момент записи l -й объектной голографической структуры. В этом случае в регистрирующей среде записывается информация об N разнесенных во времени состояниях исследуемого объекта, отображаемых функциями $\varphi_1(x, y), \varphi_2(x, y), \dots, \varphi_l(x, y), \dots, \varphi_N(x, y)$.

Таким образом, после двух этапов записи серии наложенных опорных и объектных голографических структур в одной регистрирующей среде выражение для амплитудного пропускания голограммы в случае ее линейной записи ($\gamma = -2$) можно представить в виде

$$\tau_{\Sigma}(x, y) = \tau_0 + \sum_{l=1}^N \tau_{l0} \cos[2\pi(\xi_{0l}x + \eta_{0l}y) + \varepsilon_l(x, y)] + \sum_{l=1}^N \tau_l \cos[2\pi(\xi_l x + \eta_l y) + \varepsilon_l(x, y) + \varphi_{ll}(x, y)], \quad (5)$$

где τ_0 – постоянная составляющая амплитудного пропускания; τ_{l0}, τ_l – коэффициенты, характеризующие амплитудную модуляцию l -х опорной и объектной голографических структур.

На рис.2 представлена фотография дифракционного спектра голограммы с амплитудным пропусканием вида (5) для случая записи девяти двухэкспозиционных голограмм при развороте каждой голографической структуры на фиксированный угол $\Delta\alpha = 20^\circ$. Дифракционный спектр фотографировался в задней фокальной плоскости объектива при освещении голограммы коллимированным пучком гелий-неонового лазера.

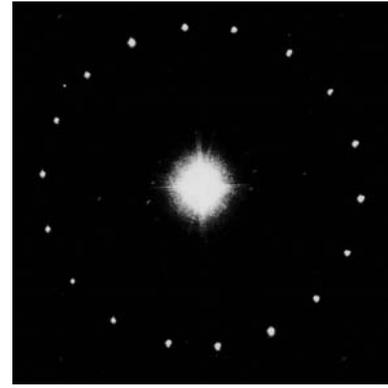


Рис.2. Дифракционный спектр голограммы для девяти наложенных опорных и объектных голографических структур.

3. Получение интерференционной картин

Для получения интерференционной картины, характеризующей состояние исследуемого объекта в определенный момент записи объектной голографической структуры, достаточно использовать фильтрацию порядков дифракции, отвечающих этой структуре.

На рис.3 приведена схема получения интерференционных картин. Излучение источника света 1 телескопической системой 2, 3 преобразовывалось в коллимированный пучок, которым освещалась голограмма 4. Фильтрация соответствующего порядка дифракции осуществлялась в задней фокальной плоскости объектива 5 отверстием в диафрагме 6.

Для получения интерференционной картины, характеризующей состояние объекта в момент записи l -й объектной голографической структуры, диафрагмой 6 выделяются волны, дифрагировавшие на l -й объектной голографической структуре и на опорной структуре. Если голограмма 4 с амплитудным пропусканием вида (5) установлена по отношению к системе координат xu в положение, соответствующее записи l -й объектной голографической структуры, то комплексные амплитуды волн, выделяемых отверстием в диафрагме 6,

$$A_{0l}(x, y) = a_0 \exp\{i[2\pi(\xi_0 x + \eta_0 y) + \varepsilon(x, y)]\}, \quad (6)$$

$$A_l(x, y) = a_l \exp\{i[2\pi(\xi_l x + \eta_l y) + \varepsilon(x, y) + \varphi_l(x, y)]\}, \quad (7)$$

где a_0, a_l – действительные амплитуды волн. Очевидно, что если экспозиции при записи l -х опорной и объектной голографических структур были равными, то $\tau_l \approx \tau_{l0}$ и, следовательно, $a_0 \approx a_l$.

В плоскости 7, оптически сопряженной объективом 5 с

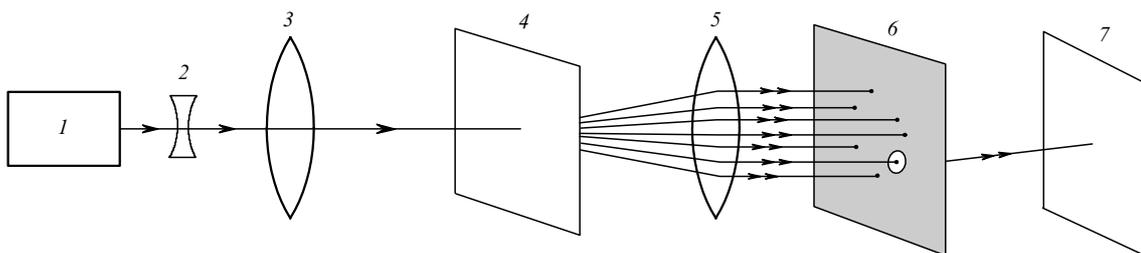


Рис.3. Оптическая схема получения интерференционных картин:

1 – источник света; 2, 3 – объективы телескопической системы; 4 – голограмма; 5 – объектив; 6 – диафрагма; 7 – плоскость наблюдения интерференционной картины.

голограммой 4, образуется интерференционная картина при наложении выделенных диафрагмой 6 волн (6), (7). Распределение освещенности в этой интерференционной картине

$$I_I(x, y) = 2a_0^2 \{1 + \cos[2\pi(\xi - \xi_0)x + (\eta - \eta_0)y + \varphi_I(x, y)]\}. \quad (8)$$

По виду выражение (8) соответствует интерференционной картине, полученной с обычной двухэкспозиционной голограммы. Аберрации системы записи голограмм $\varepsilon(x, y)$ в интерференционной картине (8) исключены.

Из (8) видно, что величины $|\xi - \xi_0|$ и $|\eta - \eta_0|$ определяют ориентацию и ширину полос интерференционной картины [1, 2]. Для $|\xi - \xi_0| \rightarrow 0$ и $|\eta - \eta_0| \rightarrow 0$ имеет место интерференционная картина в полосах бесконечной ширины. Интерференционная картина в полосах конечной ширины, параллельных оси x , наблюдается при $|\xi - \xi_0| \rightarrow 0$, а в полосах, параллельных оси y – при $|\eta - \eta_0| \rightarrow 0$. При этом ширина интерференционных полос для первого случая равна $1/|\eta - \eta_0|$, а для второго – $1/|\xi - \xi_0|$.

4. Экспериментальная апробация

Двухэкспозиционная голографическая интерферометрия в случае записи серии наложенных опорных и объектных голографических структур в одной регистрирующей среде была экспериментально апробирована при изучении распределения полей тепловых потоков воздуха в области нагреваемого медного стержня. Последний был установлен вертикально, а его нагрев происходил путем теплопередачи от электрического нагревателя, расположенного в нижней части стержня. Стержень с нагревателем размещались в объектном плече интерферометра (рис.1). В качестве регистрирующей среды использовалась голографическая фотопленка ФГ-690, которая устанавливалась в специальный оптический держатель, позволяющий осуществлять разворот пленки относительно оси z на фиксированные углы, кратные 20° . Перед нагревом стержня на фотопленке регистрировались девять наложенных опорных голографических структур. Если требовалось получить интерференционные картины в полосах бесконечной ширины, то при записи на втором этапе серии объектных голографических структур направление опорного пучка, освещающего регистрирующую среду, оставалось таким же, как и при регистрации на первом этапе опорных голографических структур. Для получения интерференционных картин в полосах конечной ширины при записи на втором этапе серии объектных голографических структур угол между опорным и объектным пучками изменялся на небольшую величину.

При нагреве медного стержня серия объектных голографических структур записывалась в регистрирующей среде через каждые 10 с.

На рис.4 представлены интерференционные картины в полосах бесконечной ширины, полученные с голограмм в устройстве восстановления (рис.3). Интерференционные картины соответствуют записи объектных голографических структур через 20, 50 и 70 с после начала нагрева.

На рис.5 приведены интерференционные картины в полосах конечной ширины. Перед записью серии объектных голографических структур угол между опорным и

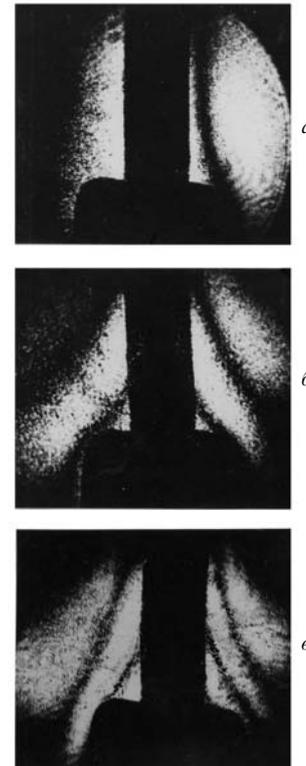


Рис.4. Интерференционные картины в полосах бесконечной ширины, полученные с голограмм и соответствующие записи объектных голографических структур через 20 (а), 50 (б) и 70 с (в) после начала нагрева.

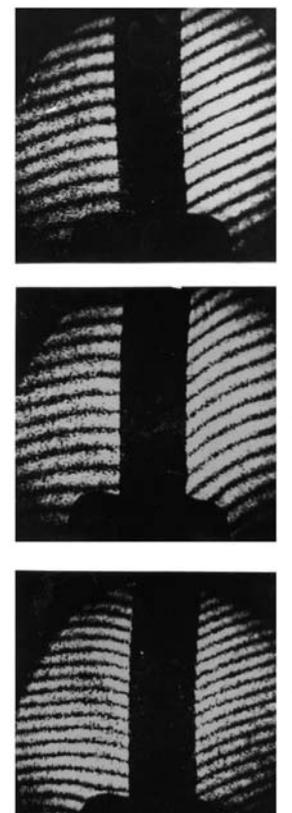


Рис.5. Интерференционные картины в полосах конечной ширины, полученные с голограмм и соответствующие записи объектных голографических структур через 20 (а), 40 (б) и 80 с (в) после начала нагрева.

объектным пучками изменялся в плоскости uz на небольшую величину по сравнению с углом голографирования. Интерференционные картины соответствуют моментам записи объектных голографических структур через 20, 40 и 80 с после начала нагрева.

Следует отметить, что аберрации системы записи голограмм в полученных интерференционных картинах (рис.4 и 5) компенсированы полностью.

5. Заключение

Основным преимуществом предложенного способа голографической интерферометрии по сравнению с ранее известными способами является то, что запись серии наложенных в одной и той же регистрирующей среде голограмм, основанная на вращении регистрирующей среды при переходе от одного цикла записи к другому, позволяет на стадии получения интерференционных картин в полосах как бесконечной, так и конечной ширины использовать более простую оптическую схему восстановления, исключая использование двух когерентных световых пучков. Основное требование к такой схеме восстановления – возможность реализации пространственной фильтрации порядков дифракции.

Экспериментальная апробация предложенного выше способа двухэкспозиционной голографической интерферометрии подтверждает перспективность его использования при исследовании нестационарных процессов. Очевидно, что минимальный интервал между двумя соседними циклами записи голографических структур не может быть меньше времени, необходимого на разворот регистрирующей среды на фиксированный угол $\Delta\alpha$, и зависит, в основном, от кинематической схемы преобразователя движений оптического держателя.

1. Бекетова А.К., Белозеров А.Ф., Березкин А.Н. и др. *Голографическая интерферометрия фазовых объектов* (Л.: Наука, 1979).
2. Вест Ч. *Голографическая интерферометрия* (М.: Мир, 1982).
3. Зейликович И.С., Спорник Н.М. *Голографическая диагностика прозрачных сред* (Минск: изд-во «Университетское», 1988).
4. Hildebrand B.R., Haines K.A. *J. Opt. Soc. Am.*, **57**, 155 (1967).
5. Кольер Р., Беркхарт К., Лин Л. *Оптическая голография* (М.: Мир, 1973).
6. Захаров Ю.Н., Менсов С.Н. В сб.: *Физические основы и прикладные вопросы голографии* (Л.: ЛИЯФ, 1984, с. 138).
7. Ляликов А.М. *ЖТФ*, **6**, 56 (2002).
8. Ляликов А.М. *Оптика и спектроскопия*, **93**, 146 (2002).
9. Корн Г., Корн Т. *Справочник по математике для научных работников и инженеров* (М.: Наука, 1984).