

# Безабберационная голографическая интерферометрия реверсивного сдвига

А.М.Ляликов

*Исследованы особенности голографической интерферометрии реверсивного сдвига, позволяющие получать в реальном масштабе времени одновременно две интерферограммы исследуемого фазового объекта, свободные от aberrаций оптической системы. Поведение полос в интерферограммах идентично их поведению в обычной двухлучевой интерферометрии с референтной эталонной волной. Рассмотрены особенности настроек полос в интерферограммах. Получены интерферограммы тестовой стеклянной пластины в реальном масштабе времени с различной настройкой полос, подтверждающие практическую перспективность данного метода.*

**Ключевые слова:** фазовый объект, волновой фронт, интерференционная картина, голограмма.

## 1. Введение

В ряде случаев применение классических методов интерферометрии [1, 2], основанных на принципе сравнения искаженного волнового фронта с фронтом опорной волны, затруднено. Это связано, в первую очередь, с проблемами формирования опорной волны. Такие трудности возникают при определении формы волнового фронта одиночного светового пучка, выходящего из лазера, или светового пучка, прошедшего возмущающие поля атмосферы [3, 4]. В этих случаях приходится применять методы исследования волнового фронта, в которых волна сравнения отсутствует или формируется из объектной волны. К ним относятся теневые способы исследования волнового фронта с использованием различных визуализирующих диафрагм [5–7], интерферометрия с локальной опорной волной или дифракцией на точке [6, 8, 9] и сдвиговая интерферометрия [6, 10, 11].

Интерферометрия сдвига привлекает к себе сравнительной простотой оптических схем реализации, а также высокой виброустойчивостью самих интерферометров и находит широкое применение в различных областях науки и техники [9–15].

Кроме интерферометрии бокового сдвига, как наиболее распространенной, в ряде случаев нашла практическое применение интерферометрия вращательного и реверсивного сдвигов [6, 16]. Использование принципов голографии при получении интерферограмм с различными типами сдвига позволило компенсировать aberrации оптической системы при проведении исследований в реальном масштабе времени [17, 18]. В работах [19, 20] было предложено задавать реверсивный сдвиг как в продольном, так и радиальном направлении. В голографической интерферометрии радиального сдвига предлага-

лось использовать для этих целей зонную пластинку Габора [21–23].

Главной особенностью интерферометрии сдвига является зависимость поведения полос в интерференционных картинах как от типа сдвига интерферирующих волновых фронтов, так и от величины сдвига. Однако если исследуемый фазовый объект занимает часть рабочего поля и его размеры меньше величины сдвига, то полосы в интерферограммах получаются такими же, как и в двухлучевой интерферометрии с опорной волной [24]. Этот частный случай для интерферометрии сдвига заслуживает особого внимания, т. к. одновременно объединяет в себе все достоинства указанных двух методов и исключает сложность расшифровки интерференционных картин, свойственную интерферометрии сдвига. Для типичных схем получения интерферограмм бокового, вращательного и реверсивного сдвигов диаметры разделенных интерферирующих световых пучков одинаковы [6, 25, 26]. Очевидно, что для таких схем при реализации отмеченного выше частного случая, размеры исследуемого объекта не могут превышать половины диаметра светового пучка.

На рис. 1 приведены геометрические изображения контуров интерферирующих световых пучков при интерферометрии бокового сдвига для сдвига  $\Delta s$ , равного половине диаметра пучка, и реверсивного сдвига. Здесь рассмотрены случаи, когда размер исследуемого фазового объекта максимален. Последний изображен на рис. 1 в виде треугольника. Ширина этого объекта вдоль направления сдвига (т. е. оси  $x$ ) не превышает половины диаметра светового пучка. Для интерферометрии бокового сдвига (рис. 1, *a*) максимальный сдвиг  $\Delta s$  вдоль оси  $x$  равен половине диаметра светового пучка. Заштрихованные площади соответствуют зонам образования интерференционных картин вследствие наложения части пучка, прошедшего через исследуемый объект, на часть пучка, не искаженного объектом. Интерферометрия реверсивного или вращательного сдвига при повороте одного из пучков на  $180^\circ$  (рис. 1, *a* и *b*), имеет преимущество перед интерферометрией бокового сдвига. Это преимущество состоит хотя бы в превышении в 1.3 раза полезной площади

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

Поступила в редакцию 11 марта 2004 г., после доработки – 6 октября 2004 г.

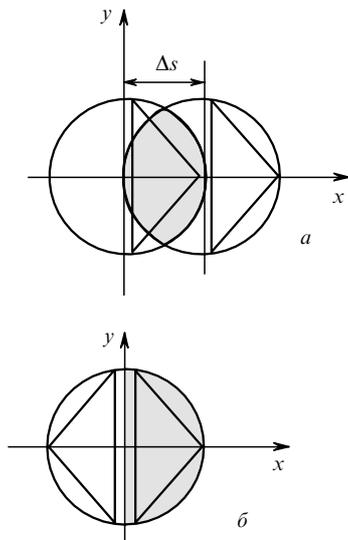


Рис.1. Изображения контуров интерферирующих пучков при интерферометрии бокового (а) и реверсивного (б) сдвига.

зоны наложения разделенных световых пучков, где наблюдается интерференционная картина, визуализирующая исследуемый фазовый объект.

В настоящей работе рассмотрены особенности голографического варианта интерферометрии реверсивного сдвига, позволяющие получать безабберационные интерферограммы исследуемого фазового объекта в реальном масштабе времени с произвольной настройкой полос, поведение которых идентично их поведению в обычной двухлучевой интерферометрии с опорной волной. Следует отметить, что данный метод интерферометрии реверсивного сдвига применим только для исследования фазовых объектов, размеры которых не превышают половины диаметра зондирующего светового пучка, и для случая полной компенсации aberrаций оптической схемы.

## 2. Экспериментальная установка

На рис.2,а приведена оптическая схема (вид сверху) установки для реализации голографической интерферометрии реверсивного сдвига. Излучение гелий-неонового лазера 1 зеркалом 2 направлялось в телескопическую систему, образованную отрицательной линзой 3 и объективом 4. Эта оптическая система формировала коллимированный световой пучок необходимых размеров для освещения исследуемого фазового объекта 5. Вторая телескопическая система, образованная объективами 6 и 7, была предназначена для уменьшения диаметра объектного светового пучка. Между объективами 4 и 6 устанавливался исследуемый фазовый объект, причем так, чтобы его размер не превышал половины диаметра светового пучка. Объектный световой пучок направлялся в интерферометр реверсивного сдвига 8.

На рис.2,б показана оптическая схема (вид сверху) используемого интерферометра реверсивного сдвига. Светоделителем 1 объектный световой пучок разделялся по амплитуде на два пучка, которые направлялись зеркалами 2 (первый пучок) и 4, 3 (второй) на второй светоделитель 5. Второй пучок света, распространяющийся по плечу интерферометра 1, 4, 3 и 5, разворачивался вокруг оси  $z$  на  $180^\circ$ . При этом направление только оси  $x$  из-

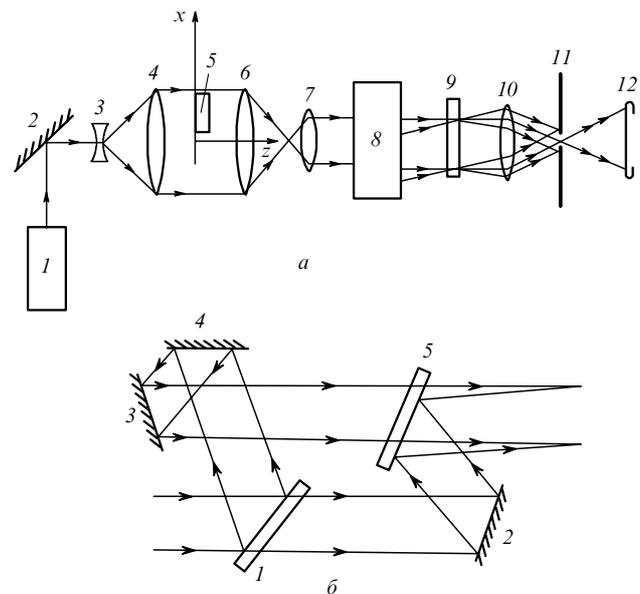


Рис.2. Оптические схемы экспериментальной установки (а) и интерферометра реверсивного сдвига (б):

а) 1 – гелий-неоновый лазер; 2 – зеркало; 3, 4 и 6, 7 – телескопические системы; 5 – исследуемый фазовый объект; 8 – интерферометр реверсивного сдвига; 9 – голограмма (плоскость голограммы); 10 – объектив; 11 – селектирующая диафрагма; 12 – плоскость регистрации интерференционной картины;

б) 1, 5 – светоделительные зеркала; 2–4 – отражающие зеркала.

менялось на противоположное, а направление оси  $y$  по отношению ко второму световому пучку оставалось прежним. Угол между интерферирующими пучками задавался разворотом зеркала 2 и светоделителя 5.

В плоскости голограммы 9 (рис.2,а) световые пучки совмещались. Голограмма 9 регистрировалась без исследуемого фазового объекта 5. На нее записывались aberrации оптической схемы установки, которые исключались на стадии получения в плоскости 12 интерференционных картин. Плоскости интерференционных картин и исследуемого объекта оптически сопрягались объективами 6, 7 и 10. Диафрагма 11, установленная в задней фокальной плоскости объектива 10, предназначалась для выделения необходимых порядков дифракции света на голограмме 9.

Следует отметить, что в качестве элементов оптической схемы установки 3, 4, 6 и 7 может быть успешно использован теневой прибор ИАБ-451 [9] или объектное плечо любого лазерного интерферометра с узким опорным пучком, например ИЗК-463 с полем визуализации 800 мм. В последнем случае с помощью рассмотренной методики можно проводить исследования фазовых объектов размерами до 400 мм.

## 3. Регистрация голограммы

Запись aberrаций оптической системы на голограмму 9 (рис.2,а) проводится до помещения исследуемого фазового объекта 5 в зону зондирующего светового пучка. Выбираем такую систему координат  $xuz$ , чтобы световой пучок, проходящий через исследуемый объект, распространялся вдоль оси  $z$ , совпадающей с главной оптической осью системы, а реверсивный сдвиг осуществлялся в интерферометре 8 изменением направления только оси  $x$  одного из световых пучков на противоположное. Пред-

положим, что оптическая схема интерферометра реверсивного сдвига (рис.2,б) настроена так, что первый световой пучок наклонен в плоскости  $xz$  к оси  $x$  на некоторый угол  $\alpha_0$ , а второй пучок, испытывающий реверсивный сдвиг, распространяется вдоль оси  $z$ . В этом случае комплексные амплитуды пучков на выходе интерферометра можно представить в виде

$$A_{01}(x, y) = a_1 \exp\{i[2\pi\xi_0 x + \varepsilon_0(x, y) + \varepsilon_1(x, y)]\}, \quad (1)$$

$$A_{02}(x, y) = a_2 \exp\{i[\varepsilon_0(-x, y) + \varepsilon_2(x, y)]\}, \quad (2)$$

где  $a_1, a_2$  – действительные амплитуды;  $\xi_0 = \cos \alpha_0 / \lambda$  определяет пространственную частоту волны;  $\lambda$  – длина волны;  $\varepsilon_0$  – искажения фазы абберациями объектного плеча оптической системы;  $\varepsilon_1(x, y)$  и  $\varepsilon_2(x, y)$  – искажения фаз абберациями первого и второго плеч интерферометра реверсивного сдвига. Таким образом, в плоскости  $9$  регистрируется голограмма. Если выполнены линейные условия регистрации и предполагается, что  $a_1 = a_2$ , то амплитудное пропускание голограммы

$$\begin{aligned} \tau(x, y) = 1 + \cos[2\pi\xi_0 x + \varepsilon_0(x, y) - \varepsilon_0(-x, y) \\ + \varepsilon_1(x, y) - \varepsilon_2(x, y)]. \end{aligned} \quad (3)$$

После химической обработки этой голограммы ее устанавливают в прежнее положение  $9$ .

#### 4. Получение интерференционных картин в реальном масштабе времени

Исследуемый фазовый объект  $5$  (рис.2,а) размещается между объективами  $4$  и  $6$  так, чтобы его размер вдоль оси  $x$  не превышал половины диаметра светового пучка. Например, объект может быть расположен в I и IV квадрантах системы координат  $xu$ . Это обязательное условие для реализации данной методики. В интерферометре реверсивного сдвига (рис.2,б) для получения интерферограммы в реальном масштабе времени с произвольной настройкой полос изменяют направление распространения первого светового пучка относительно осей  $x$  и  $y$  на небольшие по сравнению с  $\alpha_0$  углы  $\alpha$  и  $\beta$  соответственно. Голограмма  $9$  освещается двумя пучками света. Диффрагмой  $11$  выделяются волна, прямо прошедшая через голограмму  $9$ , и волна, диффрагировавшая в первый порядок. В этом случае в плоскости  $12$  появляется интерференционная картина, описываемая выражением

$$\begin{aligned} I_1(x, y) = 1 + \frac{2b_1 b_2}{b_1^2 + b_2^2} \cos\{2\pi\xi x + 2\pi\eta y \\ + [\varphi(x, y) - \varphi(-x, y)]\}, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $b_1, b_2$  – действительные амплитуды интерферирующих волн;  $\xi = \cos \alpha / \lambda$ ;  $\eta = \cos \beta / \lambda$ ;  $\varphi(x, y)$  – изменение фазы исследуемым фазовым объектом.

В интерференционной картине, полученной в реальном масштабе времени, как это видно из формулы (4), абберации оптической системы  $\varepsilon_0(x, y)$ ,  $\varepsilon_1(x, y)$  и  $\varepsilon_2(x, y)$  исключены [9, 26]. На рис.3 представлена интерферограмма реверсивного сдвига с настройкой на бесконечно широкую полосу, полученная в плоскости  $9$  в отсутствие исследуемого объекта  $5$ . Данная интерферограмма характеризует искажения интерференционных полос вслед-

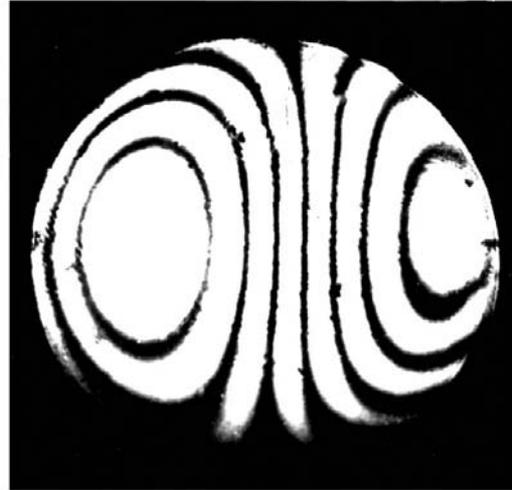


Рис.3. Интерферограмма реверсивного сдвига, характеризующая абберации экспериментальной установки.

ствие аббераций, определяемых действием суммы функций  $\varepsilon_0(x, y) - \varepsilon_0(-x, y) + \varepsilon_1(x, y) - \varepsilon_2(x, y)$  согласно (3).

Интерференционная картина (4) имеет замечательную особенность. Вследствие того, что размер исследуемого объекта вдоль оси  $x$  составлял не более половины диаметра светового пучка, т. е. объект был расположен в I и IV квадрантах плоской системы координат  $xu$ , для точек, принадлежащих II и III квадрантам, функция  $\varphi(x, y)$  обращается в нуль. Соответственно для точек, принадлежащих I и IV квадрантам, обращается в нуль функция  $\varphi(-x, y)$ . В связи с этим в плоскости наблюдения интерференционных полос  $12$  (рис.2,а) интерференционные картины, визуализирующие поведение функций  $\varphi(x, y)$  и  $\varphi(-x, y)$ , будут пространственно разнесены и расположены в I, IV и II, III квадрантах соответственно. Эти интерференционные картины условно назовем правой и левой интерферограммами.

В данном случае уравнения полос для правой и левой интерферограмм соответственно будут иметь вид

$$2\pi\xi x + 2\pi\eta y + \varphi(x, y) = 2\pi N, \quad (5)$$

$$2\pi\xi x + 2\pi\eta y - \varphi(-x, y) = 2\pi N, \quad (6)$$

где  $N = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ . Из (5) и (6) видно, что эти интерферограммы принципиально не отличаются от двухлучевых интерферограмм с эталонной волной сравнения.

На рис.4 представлена серия интерферограмм тестовой стеклянной пластины, полученных в реальном масштабе времени. Вертикальное ребро пластины расположено параллельно оси  $y$ . При этом пластина занимает меньше половины зоны объектного пучка, что обеспечивает создание вблизи оси  $y$  невозмущенной объектом зоны в виде вертикальной полоски, разделяющей интерференционную картину на правую и левую интерферограммы. В этой вертикальной полоске также визуализируется настройка интерференционных полос.

Рассмотрим частные случаи настройки интерференционных полос для правой и левой интерферограмм.

Настройка на бесконечно широкую полосу соответствует  $\xi = \eta = 0$ . В данном случае выражения (5), (6) для правой и левой интерферограмм соответственно примут вид

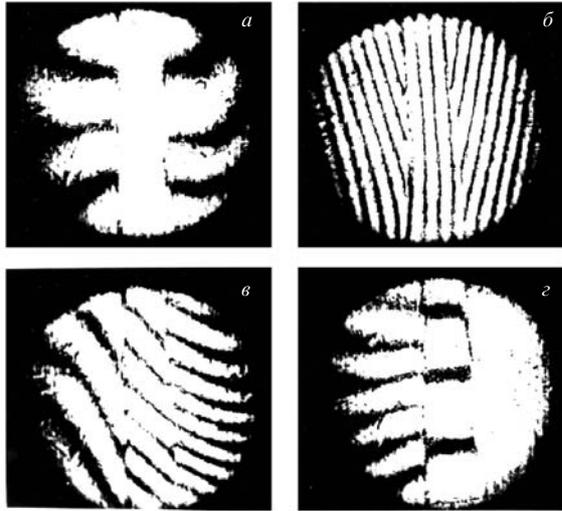


Рис.4. Интерферограммы тестовой стеклянной пластины с различной настройкой полос.

$$\varphi(x, y) - 2\pi N = 0, \quad (7)$$

$$\varphi(-x, y) - 2\pi N = 0. \quad (8)$$

Интерференционные полосы, описываемые семействами кривых (7) и (8), имеют симметрию относительно оси  $y$ .

Симметрия интерференционных полос относительно оси  $y$  наблюдается и при строгой настройке на вертикальные полосы ( $\eta = 0$ ). Уравнения полос для правой и левой интерферограмм в этом случае имеют вид

$$\varphi(x, y) + 2\pi\zeta x - 2\pi N = 0, \quad (9)$$

$$\varphi(-x, y) - 2\pi\zeta x - 2\pi N = 0. \quad (10)$$

На рис.4,а,б приведены фотографии интерференционных картин тестовой стеклянной пластины при настройке на бесконечно широкую (рис.4,а) и вертикальные (рис.4,б) полосы.

При любых других настройках симметрия относительно оси  $y$  для правой (5) и левой (6) интерферограмм будет нарушаться. Об этом свидетельствуют и фотографии интерференционных картин, приведенные на рис.4, в,г. Однако при наличии некомпенсированных аберраций отмеченная выше симметрия будет нарушаться и при настройке на бесконечно широкую и вертикальные полосы.

## 5. Заключение

Таким образом, если поперечные размеры исследуемого фазового объекта не превышают половины диаметра зондирующего светового пучка, то метод голографической интерферометрии реверсивного сдвига позволяет получать в реальном масштабе времени безаберрацион-

ную интерференционную картину в виде пары интерферограмм, визуализирующих исследуемый фазовый объект. По характеру полос эти интерферограммы не отличаются от интерференционных картин, полученных методом двухлучевой интерферометрии с опорной волной.

Симметричный характер правой и левой интерферограмм при настройке на бесконечно широкую и вертикальные полосы может быть использован при юстировке для более точной настройки картин. Обработка каждой из интерферограмм с последующим усреднением результатов позволит уменьшить погрешность определения функции  $\varphi(x, y)$ .

Нарушение симметричного характера полос при других настройках может быть использовано для повышения информативности измерений, т. е. для одновременного получения в реальном масштабе времени двух интерферограмм с различным поведением полос в зоне оптической неоднородности.

1. Коломийцов Ю.В. *Интерферометры* (Л.: Наука, 1977).
2. Нагибина И.М. *Интерференция и дифракция света* (Л.: Машиностроение, 1985).
3. Воронцов М.А., Корябин А.В., Шмальгаузен В.И. *Управляемые оптические системы* (М.: Наука, 1988).
4. Лукьянов Д.П., Корниенко А.А., Рудницкий Б.Е. *Оптические адаптивные системы* (М.: Радио и связь, 1989).
5. Васильев Л.А. *Теневые методы* (М.: Наука, 1968).
6. *Оптический производственный контроль*. Под ред. Д.Малакары (М.: Машиностроение, 1985).
7. Андреев А.И., Духопел И.И., Чунин Б.А. *Опт.-мех. пром.*, **11**, 49 (1990).
8. Иванова И.П., Цветков А.Д. *Квантовая электроника*, **21**, 389 (1994).
9. Бекетова А.К., Белозеров А.Ф., Березкин А.Н. и др. *Голографическая интерферометрия фазовых объектов* (Л.: Наука, 1979).
10. Нугуманов А.М., Смиронов Р.В., Соколов В.И. *Квантовая электроника*, **30**, 435 (2000).
11. Соколов В.И. *Квантовая электроника*, **31**, 891 (2001).
12. Schwider J. *Optik*, **108**, 181 (1998).
13. Иванов П.В., Корябин А.В., Шмальгаузен В.И. *Квантовая электроника*, **27**, 78 (1999).
14. Santhanakrishnan T., Palanisamy P.K., Sirohi R.S. *Appl. Opt.*, **37**, 3447 (1998).
15. Башкин А.С., Коротков П.И., Максимов Ю.П. и др. *Квантовая электроника*, **24**, 786 (1997).
16. Saunders J.B. *J. Res. National Bur. Stand. B*, **66**, 29 (1962).
17. Bryngdahl O. *J. Opt. Soc. Am.*, **58**, 865 (1968).
18. Kulkarni V.G. *Opt. Laser Technol.*, **11**, 269 (1979).
19. Bryngdahl O. *J. Opt. Soc. Am.*, **59**, 142 (1969).
20. Bryngdahl O. *J. Opt. Soc. Am.*, **60**, 915 (1970).
21. Fouere J.C., Roychoudhuri C. *Opt. Commun.*, **12**, 29 (1974).
22. Fouere J.C., Malacara D. *Appl. Opt.*, **13**, 2035 (1974).
23. Fouere J.C. *Opt. Laser Technol.*, **6**, 181 (1974).
24. Комиссарук В.А. В сб.: *Исследования пространственных газодинамических течений на основе оптических методов. Труды ВВИА им. Н.Е.Жуковского* (М., 1971, с. 121).
25. Васильев Л.А., Ершов И.В. *Интерферометр с дифракционной решеткой* (М.: Машиностроение, 1997).
26. Вест Ч. *Голографическая интерферометрия* (М.: Мир, 1982).