

*Двенадцатая Международная научно-техническая конференция
«Оптические методы исследования потоков»
Москва, 25 — 28 июня 2013 г.*

УДК 681.787

А.И. Буть, А.М. Ляликов

*Учреждение образования «Гродненский государственный университет имени Янки
Купалы», Беларусь*

230023, Гродно, Ожешко ул., 22, E-mail: amlialikov@grsu.by

ИСКЛЮЧЕНИЕ СИСТЕМАТИЧЕСКОЙ ПОГРЕШНОСТИ ПУТЕМ КОРРЕКЦИИ ПЕРЕМЕННЫХ АБЕРРАЦИЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРА

АННОТАЦИЯ

Показана теоретически и подтверждена экспериментально возможность уменьшения переменной систематической погрешности интерферометрических измерений путем повышения степени компенсации остаточных aberrаций интерферометра. Доказано, что в случае переменного характера aberrаций интерферометра одной опорной голограммы для коррекции aberrаций недостаточно, а используя несколько опорных голограмм, на которые записаны aberrации, можно восстанавливать интерференционные картины, влияние остаточных aberrаций на ход полос в которых сведено до определенного минимального уровня.

**ИНТЕРФЕРОМЕТРЫ, ГОЛОГРАФИЧЕСКАЯ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЯ, АБЕРРАЦИИ
ИНТЕРФЕРОМЕТРА, КОМПЕНСАЦИЯ ПЕРЕМЕННЫХ АБЕРРАЦИЙ,
СИСТЕМАТИЧЕСКИЕ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ**

ВВЕДЕНИЕ

Одним из путей обеспечения правильности измерений, являющейся качеством, отражающим близость к нулю систематической погрешности в их результатах [1], при интерферометрических измерениях достигается путем коррекции aberrаций. Aberrации оптической схемы, возникающие вследствие неточности изготовления отдельных оптических элементов, а также их юстировки, вносят значительный вклад в инструментальную погрешность [2,3]. Создание интерферометров путем оптимизации каждого оптического элемента на минимизацию aberrаций дорого и не всегда оправдывает себя, особенно в случаях, если величина остаточных aberrаций зависит от настройки интерферометра или определяется особенностями измерений. В последнем случае остаточные aberrации носят переменный характер и соответствующим образом приводят к переменным систематическим погрешностям измерений. Наибольшее распространение при интерферометрических измерениях получили способы уменьшения систематической погрешности [1], основанные на изменении знака систематической погрешности, в интерферометрических измерениях - путем использования опорной голограммы [4,5], или введения поправок на этапе цифровой обработки интерферограмм [6,7]. Примером возникновения переменных aberrаций является интерферометрия переменного бокового сдвига и интерферометрические измерения при наличии термических воздействий на исследуемый объект и элементы интерферометра.

В ряде случаев требуется в реальном времени отображать интерферометрическим способом параметры исследуемых объектов. Оптимальным путем решения этой задачи

является коррекция aberrаций с помощью опорной голограммы. В этом случае обеспечивается безабберационное отображение в интерференционных картинах измеряемых характеристик объекта, и тем самым обеспечивается правильность измерений.

МЕТОД ИСКЛЮЧЕНИЯ СИСТЕМАТИЧЕСКОЙ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ

В голографической интерферометрии фазовых объектов [4,8] при отображении в реальном времени фазовых характеристик исследуемого объекта исключение aberrаций оптической схемы, реализуется за счет использования опорной голограммы, т.е. голограммы, записанной без исследуемого объекта.

При получении интерференционной картины, отображающей фазовые характеристики исследуемого объекта, взаимодействуют две световых волны: прошедшая исследуемый фазовый объект и опорная. Распределение комплексных амплитуд интерферирующих волн

$$A_1(x, y) = a_1 \exp[i(\varphi + \varepsilon_1)], \quad (1)$$

$$A_2(x, y) = a_2 \exp(i\varepsilon_2), \quad (2)$$

где a_1, a_2 - действительные амплитуды первой и второй волн, φ - функция, описывающая фазовые характеристики исследуемого объекта, ε_1 и ε_2 - изменения фазы световой волны и из-за aberrаций оптической схемы соответственно для первой и второй волн. Распределение освещенности в интерференционной картине, отображающей фазовые характеристики исследуемого объекта, определится как

$$I(x, y) \sim 1 + \cos(\varphi + \Delta\varepsilon), \quad (3)$$

где величина остаточных aberrаций $\Delta\varepsilon$ определяется выражением

$$\Delta\varepsilon = \varepsilon_1 - \varepsilon_2. \quad (4)$$

Из последнего выражения следует, что в случае переменного характера поведения функций ε_1 и ε_2 , величина остаточных aberrаций $\Delta\varepsilon$ также переменна.

При традиционном способе компенсации aberrаций в голографической интерферометрии реального времени используют на стадии отображения фазовых характеристик исследуемого объекта в схеме интерферометра опорную голограмму, записанную без исследуемого объекта. Коэффициент амплитудного пропускания такой голограммы

$$\tau_0(x, y) \sim \{1 + \cos[2\pi\nu x + \Delta\varepsilon]\}, \quad (5)$$

где ν - несущая частота полос голограммы в частном случае их ориентации перпендикулярно оси x . Данная голограмма в зависимости от типа носителя обрабатывается на месте или после обработки устанавливается в прежнее место. Обычно точность установки эталонной голограммы дополнительно контролируется по получению интерференционной картины в полосах бесконечной ширины [4,8].

После помещения исследуемого фазового объекта в интерферометр опорную голограмму освещают световыми волнами, участвующими при ее записи, без изменения геометрии оптической схемы. Интерференционная картина с компенсацией aberrаций, отображающая в реальном времени фазовые характеристики исследуемого объекта в полосах бесконечной ширины будет иметь вид

$$I(x, y) \sim 1 + \cos \varphi. \quad (6)$$

Однако если в процессе отображения фазовых характеристик исследуемого объекта произойдет изменение величины aberrаций ε_1 и ε_2 на ε_{1i} и ε_{2i} , то вместо (6) будем иметь

$$I(x, y) \sim 1 + \cos(\varphi + \Delta\varepsilon_i), \quad (7)$$

где

$$\Delta\varepsilon_i = (\varepsilon_1 - \varepsilon_{1i}) - (\varepsilon_2 - \varepsilon_{2i}). \quad (8)$$

Очевидно, что остаточные aberrации $\Delta\varepsilon_i$ также носят переменный характер. В случае если их величины, превышают допустимое значение, при отображении фазовых характеристик исследуемого объекта возникнут погрешности, которые необходимо исключить. Таким образом, проведенный анализ остаточных aberrаций $\Delta\varepsilon_i$ показывает, что для полного их исключения использование только одной опорной голограммы не достаточно.

Покажем возможность компенсации остаточных aberrаций $\Delta\varepsilon_i$ в интерференционных картинах до определенного допустимого уровня $\Delta\varepsilon_{\min}$. Предположим, что при интерферометрическом отображении в реальном времени фазовых характеристик исследуемого объекта величин $\Delta\varepsilon_i$ определяется параметром s (время, температура, величина бокового сдвига и т.п.). Предположим, что функция $\Delta\varepsilon$ монотонно возрастает в интервале $[s_1, s_N]$ и принимает значения в интервале $[\Delta\varepsilon_1, \Delta\varepsilon_N]$. На рис. 1 приведен график приближенной зависимости величины остаточных aberrаций $\Delta\varepsilon$ от параметра s .

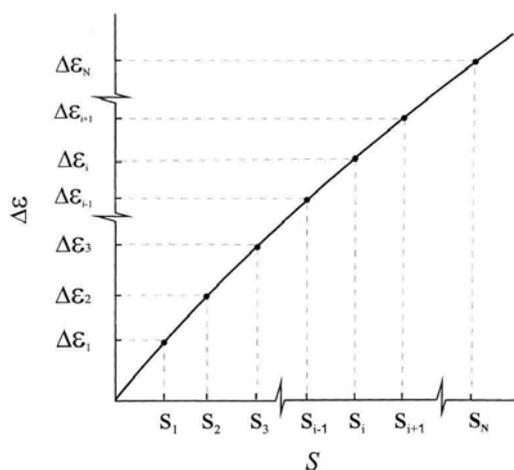


Рис.1. График приближенной зависимости величины остаточных aberrаций

Разобьем интервал $[s_1, s_N]$ на N зон таким образом, что для любого значения s_i с четным индексом справедливо

$$\begin{aligned} |\Delta\varepsilon_{i+1} - \Delta\varepsilon_i| &\leq \Delta\varepsilon_{\min}, \\ |\Delta\varepsilon_i - \Delta\varepsilon_{i+1}| &\leq \Delta\varepsilon_{\min}. \end{aligned} \quad (9)$$

В этом случае, очевидно, что если использовать голографический вариант компенсации aberrаций с одной опорной голограммой, записанной при величине параметра s соответствующего s_i , остаточными aberrациями можно пренебречь только при изменении s в интервале $[s_{i-1}, s_{i+1}]$. Очевидно, что если записать серию опорных голограмм вида (5) для различных значений параметра s , соответствующих s_i с четным индексом (рис.1), т.е. равных s_2, s_4, \dots , то для любого значения параметра s в интервале $[s_1, s_N]$ при использовании соответствующей опорной голограммы можно отображать фазовые характеристики исследуемого объекта с величиной остаточных aberrаций, удовлетворяющих условию (9).

Примером наличия переменной систематической погрешности явились интерферометрические измерения термооптических и термомеханических характеристик прозрачных твердых тел, помещаемых в камеру с нагревателем. На рис. 2 приведены интерференционные картины, полученные в интерферометре для различных режимов работы нагревателя при температуре в камере 30°C (рис.2,a) и 60°C (рис.2,b).

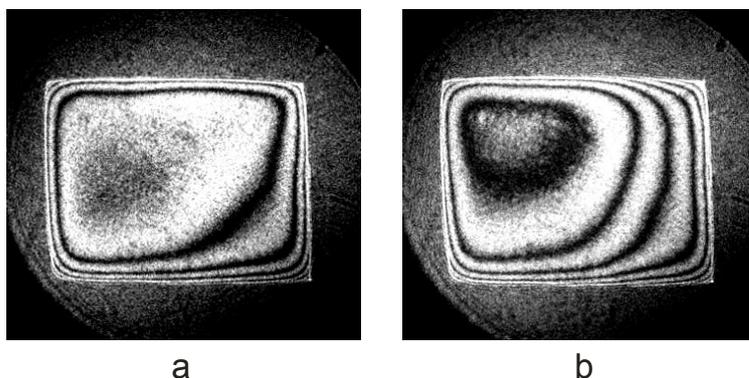


Рис. 2. Интерференционные картины, характеризующие aberrации интерферометра для различных режимов работы нагревателя при температуре в камере 30°C (a) и 60°C (b)

Камера была расположена в одном из плеч интерферометра. Данные интерферограммы свидетельствуют о переменном характере остаточных aberrаций интерферометра. Для коррекции данного типа aberrаций записывалась серия опорных голограмм для различных температур нагревателя. Запись серии опорных голограмм производилась последовательно на один общий носитель, установленный в специальный держатель с возможностью контролируемого разворота вокруг нормали к поверхности носителя по методике, описанной в работах [9,10].

На следующем рис.3 представлены интерферограммы, восстановленные с использованием эталонных голограмм, записанных для режимов работы нагревателя при температуре в камере 30°C (рис.3,a) и 60°C (рис.3,b).

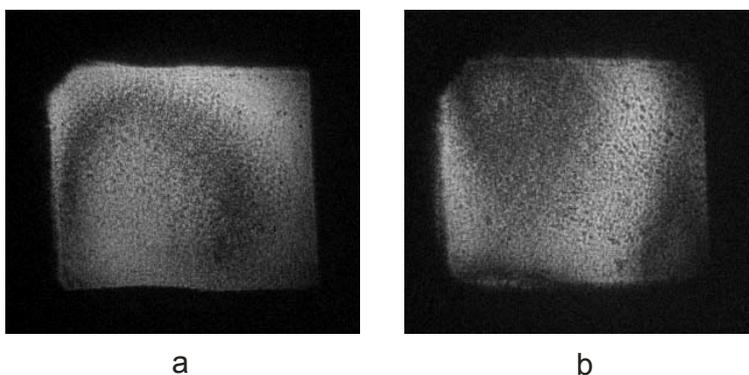


Рис. 3. Интерференционные картины, восстановленные с коррекцией aberrаций для режимов работы нагревателя при температуре в камере 30°C (a) и 60°C (b)

Данные интерферограммы подтверждают достаточно полную коррекцию aberrаций до уровня 0.25λ .

ЗАЛЮЧЕНИЕ

В работе теоретически проанализировано влияние переменных aberrаций на результирующую интерференционную картину при их коррекции традиционным способом, с помощью одной опорной голограммы. Показано, что использование одной опорной голограммы для коррекции aberrаций недостаточно. Доказана и экспериментально подтверждена возможность при использовании нескольких опорных голограмм уменьшения переменной систематической погрешностей интерферометрических измерений путем повышения степени компенсации остаточных aberrаций интерферометра до определенного минимального уровня.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Орнатский П.П.** Теоретические основы информационно-измерительной техники. Киев: Вища школа, 1983. 451 с.
2. **Якушенко Ю.Г.** Теория и расчет оптико-электронных приборов. М.: Логос, 2004. 472 с.
3. **Кирилловский В.К.** Оптические измерения. Конспект лекций. Ч.1. СПб.: СПбГИТМО(ТУ), 2002. 40 с.
4. **Вест Ч.** Голографическая интерферометрия. М.: Мир, 1982. 504 с.
5. **Colomb T., Kuhn J., Charriere F., Depeursinge C., Marquet P., Aspert N.** Optics Express. 2006. Vol. 14, № 10. P. 4300-4306
6. **Schnars U., Jueptner W.** Digital holography digital hologram recording, numerical reconstruction, and related techniques. Berlin: Springer, 2005. 161 p.
7. **Thurman S. T., Fienup J. R.** // JOSA A. 2008. Vol. 25. № 4. P. 995-999.
8. **Бекетова А.К., Белозеров А.Ф., Березкин А.Н.** и др. Голографическая интерферометрия фазовых объектов. Л.: Наука, 1979. 232 с.
9. **Ляликов А.М.** // Опт. и спектр. 2006. Т.100. № 3. С.511- 515.
10. **Лявшук И.А., Ляликов А.М.** // Квант. электроника. 2006. Т.36. № 3. С. 154-158.

A.I. But', A.M. Lyalikov

*Yanka Kupala State University, Belarus
230023, Grodno, Ozheshko str., 22, E-mail: amlialikov@grsu.by*

SYSTEMATIC ERROR ELIMINATION BY CORRECTION OF VARIABLE INTERFEROMETER ABERRATIONS

The possibility of reducing the variable systematic error in interferometry measurements via a higher degree of compensation of residual aberrations of the interferometer is shown theoretically and verified experimentally. It is proven that, in the case when interferometer aberrations are variable, one reference hologram is insufficient to correct aberrations. However, using several reference holograms on which the aberrations are recorded, it is possible to reconstruct interference patterns in which the influence of residual aberrations on the behavior of bands is reduced to a definite minimal level.

INTERFEROMETERS, HOLOGRAPHIC INTERFEROMETRY, INTERFEROMETER ABERRATIONS, COMPENSATION OF RESIDUAL ABERRATIONS, SYSTEMATIC ERROR