

РАССЕЯНИЕ И ПЕРЕНОС ОПТИЧЕСКИХ ВОЛН  
В АТМОСФЕРЕ И ОКЕАНЕ

УДК 778.38

В.Г. Гусев

**ФОРМИРОВАНИЕ ИНТЕРФЕРОГРАММ БОКОВОГО СДВИГА В ДИФFUЗНО РАССЕЯННЫХ ПОЛЯХ ПРИ ТРЕХЭКСПОЗИЦИОННОЙ ЗАПИСИ ЛИНЗОВОЙ ГОЛОГРАММЫ ФУРЬЕ**

Приведен анализ интерферометра бокового сдвига на основе трехэкспозиционной записи линзовой голограммы Фурье матового экрана. Показано, что при проведении пространственной фильтрации в плоскости голограммы обеспечивается контроль волновых aberrаций линзы или объектива по полю.

В классической интерферометрии было показано, что реализуемая с помощью дифракционных решеток [1] трехлучевая интерферограмма со сдвигом волновых фронтов приводит к появлению муаровых полос, уравнение для которых имеет степень на две единицы ниже по сравнению с многочленом волновых aberrаций, что позволяет быстро и точно определять коэффициенты, характеризующие волновые aberrации [2]. В [3] на основе трехэкспозиционной записи голограммы Френеля матового экрана (при его освещении излучением с квазиплоским волновым фронтом путем совмещения объективных спекл-полей трех экспозиций) приведена реализация метода получения трехэкспозиционной интерферограммы с муаровыми полосами для контроля волнового фронта.

В настоящей статье рассматривается метод трехэкспозиционной записи линзовой голограммы Фурье матового экрана для контроля волновых aberrаций положительной линзы или объектива по полю.

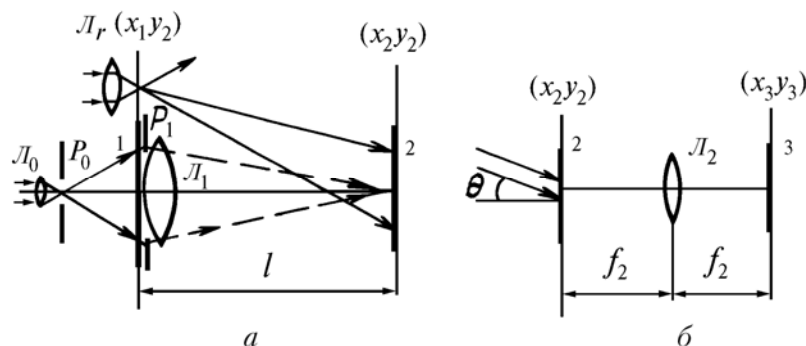


Рис. 1. Схема записи (а) и восстановления (б) трехэкспозиционной линзовой голограммы Фурье: 1 – матовый экран; 2 – фотопластинка-голограмма; 3 – плоскость регистрации интерференционной картины;  $L_0$ ,  $L_1$ ,  $L_2$  – линзы;  $p_0$  – пространственный фильтр;  $p_1$  – апертурная диафрагма

Согласно рис. 1, а матовый экран 1, находящийся в плоскости  $(x_1, y_1)$ , освещается излучением с безабберационной расходящейся сферической волной, имеющей радиус кривизны  $R$ , которая формируется с помощью линзы  $L_0$  и точечного отверстия в непрозрачном экране  $p_0$ , находящегося в ее фокусе. С помощью линзы  $L_1$ , расположенной вплотную к матовому экрану, формируется в плоскости  $(x_2, y_2)$  фотопластинки 2 его Фурье образ при выполнении условия  $R = f_1 l / (l - f_1)$  [4], где  $f_1$  – фокусное расстояние контролируемой линзы  $L_1$ ;  $l$  – расстояние между плоскостями  $(x_1, y_1)$ ,  $(x_2, y_2)$ . С использованием расходящейся сферической опорной волны с радиусом кривизны  $r = l$  в плоскости фотопластинки проводится запись голограммы Фурье за время первой экспозиции. Перед второй экспозицией матовый экран и линза  $L_1$ , закрепленные на общем механизме сдвига, смещаются в направлении, перпендикулярном оптической оси, например, в направлении оси  $x$  на величину  $a$ . Перед записью третьей экспозиции их смещение, симметричное относительно оптической оси, проводится на ту же величину. На стадии восстановления голограмма освещается малоапертурным лазерным пучком (рис. 1, б), составляющим с нормалью к плоскости фотопластинки угол  $\theta = \arctg b/l$ , где  $b$  – расстояние от оптической оси до фокальной точки линзы  $L_r$  (рис. 1, а), и в фокальной плоскости  $(x_3, y_3)$  линзы  $L_2$  с фокусным расстоянием  $f_2$  регистрируется интерференционная картина.

На основании [4] восстановленные в плоскости  $(x_2, y_2)$  комплексные амплитуды полей трех экспозиций в пределах апертуры лазерного пучка, характеризуемой функцией  $p_2(x_2, y_2)$  [5], можно представить в виде

$$u_0(x_2, y_2) \sim p_2(x_2, y_2) \{F[\kappa x_2/l, \kappa y_2/l] \otimes P_1(x_2, y_2)\}, \quad (1)$$

$$u_{1,2}(x_2, y_2) \sim p_2(x_2, y_2) \{F[\kappa x_2/l, \kappa y_2/l] \otimes \exp(\mp i\kappa a x_2/l) P_1(x_2, y_2)\}, \quad (2)$$

где  $\otimes$  — символ операции свертки;  $\kappa$  — волновое число;  $F[\kappa x_2/l, \kappa y_2/l] = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} t(x_1, y_1) \exp[-i\kappa \times (x_1 x_2 + y_1 y_2) / l] dx_1 dy_1$  — Фурье образ комплексной амплитуды пропускания  $t(x_1, y_1)$  матового экрана, являющейся случайной функцией координат;  $P_1(x_2, y_2) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} p_1(x_1, y_1) \exp i\varphi(x_1, y_1) \exp[-i\kappa \times (x_1 x_2 + y_1 y_2) / l] dx_1 dy_1$  — Фурье образ обобщенной функции  $p_1(x_1, y_1) \exp i\varphi(x_1, y_1)$  зрачка контролируемой линзы  $L_1$  (рис. 1, а), учитывающей ее осевые волновые aberrации.

При записи выражений (1), (2) полагалось, что восстановление голограммы проводится в точке, лежащей на оптической оси. Тогда в пределах области проведения пространственной фильтрации совпадают субъективные спекл-поля трех экспозиций, представленных выражениями (1), (2), при соответствующих относительных углах наклона между ними. Кроме того, информация о фазовых искажениях, вносимых в световую волну контролируемой линзой  $L_1$  (рис. 1, а), заключена в пределах индивидуального субъективного спекла в плоскости голограммы, амплитудно-фазовое распределение поля в пределах которого является результатом дифракции на зрачке линзы  $L_1$  плоской волны, распространяющейся вдоль оптической оси.

При осуществлении преобразования Фурье с помощью линзы  $L_2$  (рис. 1, б) дифракционное поле в плоскости  $(x_3, y_3)$

$$u(x_3, y_3) \sim \{t(-\mu x_3, -\mu y_3) [p_1(-\mu x_3, -\mu y_3) \exp i\varphi(-\mu x_3, -\mu y_3) + p_1(-\mu x_3 - a, -\mu y_3) \exp i\varphi(-\mu x_3 - a, -\mu y_3) + p_1(-\mu x_3 + a, -\mu y_3) \exp i\varphi(-\mu x_3 + a, -\mu y_3)]\} \otimes P_2(x_3, y_3), \quad (3)$$

где  $\mu = l / f_2$ ;  $P_2(x_3, y_3) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} p_2(x_2, y_2) \exp[-i\kappa(x_2 x_3 + y_2 y_3) / f_2] dx_2 dy_2$ , в пределах перекрытия изображений зрачка линзы  $L_1$  является результатом наложения идентичных спекл-полей трех экспозиций. И суперпозиция коррелирующих спекл-полей приводит к распределению освещенности

$$I(x_3, y_3) \sim \left\{ 1 + 4 \cos \left[ \varphi(-\mu x_3, -\mu y_3) - \frac{\varphi(-\mu x_3 + a, -\mu y_3) + \varphi(-\mu x_3 - a, -\mu y_3)}{2} \right] \right\} \times \\ \times \cos \left[ \frac{\varphi(-\mu x_3 + a, -\mu y_3) - \varphi(-\mu x_3 - a, -\mu y_3)}{2} \right] + \\ + 4 \cos^2 \left[ \frac{\varphi(-\mu x_3 + a, -\mu y_3) - \varphi(-\mu x_3 - a, -\mu y_3)}{2} \right] |t(-\mu x_3, -\mu y_3) \otimes P_2(x_3, y_3)|^2. \quad (4)$$

Выражение (4) описывает спекл-структуру, промодулированную интерференционными полосами, представляющими две интерференционные картины бокового сдвига, точки пересечения максимумов которых образуют муаровы полосы. Без учета масштабного преобразования для сферической aberrации первого порядка уравнение, описывающее систему муаровых полос, имеет вид  $[\partial^2 \varphi(x_3, y_3) / \partial x_3^2] a = A(12x_3^2 + y_3^2)a = n\lambda$ , где  $A$  — коэффициент сферической aberrации,  $n$  — порядок интерференционной полосы,  $\lambda$  — длина волны когерентного источника света, используемого для записи и восстановления голограммы. Уравнение является квадратичным и форма полос представляет систему эллипсов с отношением большой и малой осей, равной  $\sqrt{3}$ . Их большие оси при этом параллельны оси  $y$ .

В случае смещения голограммы относительно восстанавливающего ее малоапертурного лазерного пучка в направлении оси сдвига амплитудно-фазовое распределение поля в пределах субъективного спекла в окрестности точки с координатами  $x_2, y_2 = 0$  является результатом дифракции на зрачке линзы  $L_1$  плоской волны, распространяющейся под углом  $x_2/l$  к оптической оси. Следовательно, при проведении пространственной фильтрации вне оптической оси образуется интерференционная картина, характеризующая сочетание сферической aberrации и комы. Уравнение, описывающее систему муаровых полос, в этом случае принимает вид  $A(12x_3^2 + 4y_3^2)a + 6B\xi x_3 a = n\lambda$ , где  $\xi = x_2/\lambda l$  —

пространственная частота;  $B$  — коэффициент, характеризующий внеосевую aberrацию типа комы. Форма муаровых полос представляет также систему эллипсов, но положение их центра смещается по оси сдвига на величину, зависящую от  $B$ , координаты точки голограммы, в которой проводится ее восстановление, и от величины сдвига  $a$ .

В эксперименте в качестве когерентного источника света использовалось излучение He—Ne-лазера на длине волны 0,63 мкм. Трехэкспозиционная запись голограммы Фурье матового экрана проводилась с помощью линзы с фокусным расстоянием 90 мм, диаметром зрачка  $d = 52$  мм для  $R = 145$  мм,  $l = 240$  мм,  $a = 0,6 \pm 0,002$  мм. Точность  $\Delta a$  проводимого сдвига перед экспозициями удовлетворяла условию  $\Delta a \leq \lambda l / d$ , которое следует из требования, чтобы изменение фазы волны в пределах зрачка контролируемой линзы не превосходило  $\pi$ .

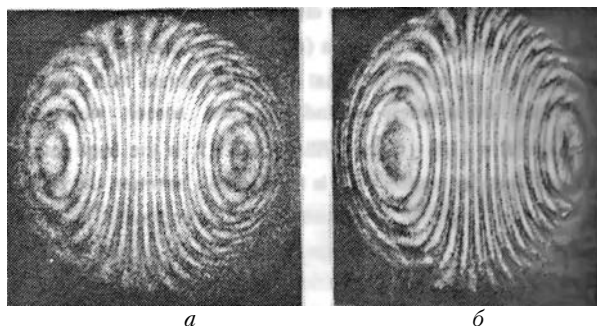


Рис. 2. Интерферограммы бокового сдвига, зарегистрированные при проведении пространственной фильтрации в плоскости голограммы: *a* — на оптической оси, *б* — вне оптической оси

На рис. 2, *a* представлена трехэкспозиционная интерферограмма бокового сдвига, зарегистрированная при проведении пространственной фильтрации на оптической оси путем восстановления голограммы малоапертурным  $\approx 2$  мм лазерным пучком и характеризующая осевые aberrации контролируемой линзы. Интерферограмма бокового сдвига на рис. 2, *б* соответствует случаю восстановления голограммы в точке, находящейся на расстоянии 8 мм от оптической оси. Муаровы полосы характеризуют сочетание сферической aberrации и комы.

Таким образом, трехэкспозиционная запись линзовой голограммы Фурье матового экрана приводит к формированию муаровых полос, характеризующих волновые aberrации контролируемой линзы. Причем проведение пространственной фильтрации позволяет выделить интерференционные картины, соответствующие как сферической aberrации, так и сочетанию сферической и внеосевой волновой aberrации типа комы. Следует также отметить, что трехэкспозиционная запись голограммы на основе совмещения субъективных спектров трех экспозиций может быть проведена путем сдвига единым механизмом матового экрана и контролируемой линзы [6] или сдвига матового экрана и фотопластины [7].

1. Комиссарук В. А. // Оптика и спектроскопия. 1964. Т. 16. В. 6. С. 1054—1060.
2. Комиссарук В. А. // Оптико-мех. промышленность. 1970. № 3. С. 10—13.
3. Гусев В. Г. // Оптика и спектроскопия. 1990. Т. 69. В. 4. С. 914—917.
4. Гусев В. Г. // Оптика атмосферы и океана. 1992. Т. 5. № 2. С. 115—124.
5. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1970. 846 с.
6. Гусев В. Г. // Оптический журнал. 1992. № 4. С. 3—7.
7. Гусев В. Г. // Оптика атмосферы и океана. 1992. Т. 5. № 4. С. 339—348.

Томский государственный университет им. В. В. Куйбышева

Поступила в редакцию  
17 июня 1992 г.

**V. G. Gusev. Formation of the Lateral Shear Interferograms with Scattered Light Using a Three-Exposure Recording of a Lens Fourier Hologram.**

Operation of a lateral shear interferometer based on a three-exposure recording of a lens Fourier hologram of a mat screen is analyzed. It is shown that a spatial filtering, if performed in the hologram plane, makes it possible to control the wave aberrations of a lens or an objective over its field.