

09  
**Определение субпиксельных микросмещений спекл-структуры методом фазового сдвига поля пространственного спектра**

© Л.А. Максимова,<sup>1</sup> П.В. Рябухо,<sup>1,2</sup> Н.Ю. Мысина,<sup>1</sup> В.П. Рябухо<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Институт проблем точной механики и управления РАН,  
410028 Саратов, Россия

<sup>2</sup> Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского,  
410012 Саратов, Россия  
e-mail: MaksimovaLA@yandex.ru

(Поступило в Редакцию 8 декабря 2016 г.)

Предложен и экспериментально реализован метод измерения субпиксельных микросмещений спекл-структуры, основанный на определении параметров линейного фазового набега, образующегося в поле комплексного пространственного спектра смещенной спекл-структуры, путем численного введения дополнительного фазового сдвига спектра и корреляционного анализа возникающего смещения линейного фазового набега в пространственном спектре спеклограммы. Метод позволяет расширить диапазон измерений, производимых с помощью метода цифровой спекл-фотографии, для случая, когда период интерференционных полос, формируемых в суммарном пространственном спектре спеклограмм, оказывается существенно больше ширины спектра.

DOI: 10.21883/JTF.2017.08.44741.2128

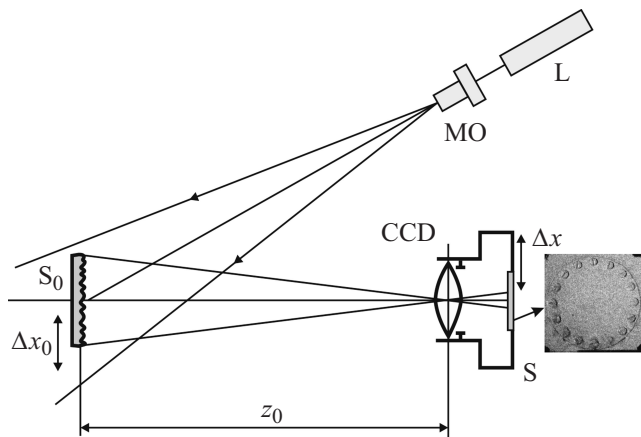
Спекл-структура формируется при отражении когерентного лазерного излучения от рассеивающей поверхности или при прохождении через пространственно случайно неоднородную среду [1,2]. Изменения, происходящие с рассеивающими объектами, вызывают изменения в амплитудно-фазовом распределении комплексной амплитуды и интенсивности спекл-поля. С помощью методов спекл-интерферометрии можно определить изменения, произошедшие в спекл-полях, и, таким образом, получить информацию об изменении состояния рассеивающего объекта [2,3].

Использование в цифровой спекл-интерферометрии [3,4–6] метода взаимной корреляции смещенной и несмещенной спекл-структур позволяет получать информацию о смещении спеклов без преобразования в частотную область. Корреляционные методы позволяют измерять смещения спеклов в изображениях с точностью до периода расположения пикселей матрицы цифровой фотокамеры [4,5], величина которого используется в качестве рабочей меры длины в этих методах. Для измерений микросмещений изображений в субпиксельном диапазоне применяются итерационные вычислительные подходы [6]. В [7] субпиксельная точность корреляционного метода достигается с помощью итерационных подходов и статистического анализа зарегистрированных спекл-полей.

В настоящей работе предложен метод обработки комплексных пространственных спектров изображений спекл-структур для измерения их микросмещений в субпиксельном диапазоне на основе определения параметров линейного фазового набега, образующегося в поле комплексного пространственного спектра смещенной спекл-структуры, путем численного введения дополнительного фазового сдвига спектра и корреляционного

анализа возникающего смещения линейного фазового набега в пространственном спектре спеклограммы. Введение дополнительного постоянного фазового сдвига в поле пространственного спектра приводит к соответствующему смещению линейного фазового набега в спектре смещенной спеклограммы. Для определения величины смещения линейного участка графика функции фазового набега используется построчный корреляционный анализ положений точек графика до смещения и после. Предложенный метод позволяет найти величину наклона линейного участка графика функции фазового набега в пределах пространственного спектра и определить с достаточно большой точностью субпиксельное смещение спекл-структуры.

Однородное смещение спекл-структуры  $\Delta x$  относительно ее исходного положения вызывает в комплексном пространственном спектре спекл-структуры линейный фазовый набег — фазовую модуляцию, параметры которой (угол наклона линейного участка графика функции фазового набега) зависят от величины взаимного смещения спекл-структур  $\Delta x$ . Фазовая модуляция проявляется в суммарном пространственном спектре исходной и смещенной спекл-структур — в дифракционном гало в виде системы интерференционных полос [2–4]. Формирование интерференционной картины в дифракционном гало дает возможность визуализировать сигнал и контролировать процесс измерения, если период интерференционных полос меньше размеров гало. Преобразование в частотную область позволяет получить измеряемые величины с субпиксельной точностью по распределению интенсивности интерференционной картины дифракционного гало [8] или определить субпиксельные смещения по наклону линейного участка графика функции фазового набега в поле комплексного пространственного спектра



**Рис. 1.** Оптическая схема записи спекл-структур сфокусированного изображения с использованием цифровой фотокамеры: L — лазер ( $\lambda \approx 0.63 \mu\text{m}$ ), MO — микрообъектив ( $20\times$ ,  $MA = 0.4$ ),  $S_0$  — объект, CCD — цифровая фотокамера, S — спекл-модулированное изображение, регистрируемое на матрице цифровой фотокамеры.

смещенной спекл-структуры [9]. В реальных условиях анализ функции фазового набега затруднен из-за эффектов случайной пространственной модуляции, поэтому в [9] для анализа сигнала используются итерационные и интерполяционные вычислительные процедуры.

На рис. 1 представлена схема реализации метода цифровой спекл-фотографии отражающих рассеивающих объектов с цифровой регистрацией спекл-структуры действительного изображения поверхности объекта. На матрицу цифровой фотокамеры проецируются и затем регистрируются спекл-структуры рассеянного объектом поля, соответствующие исходному состоянию и смещенному в результате поперечного сдвига рассеивающего объекта. В наших экспериментах коэффициент поперечного уменьшения оптической системы (рис. 1) рассчитывался таким образом, чтобы смещение рассеивающего объекта  $\Delta x' = 100 \mu\text{m}$  соответствовало смещению регистрируемого изображения объекта и спекл-структуры в пространстве изображений  $\Delta x = 1 \text{ pixel} \approx 12.2 \mu\text{m}$ , где pixel означает период расположения пикселей. На рис. 2, a представлено изображение по интенсивности разностного пространственного спектра спекл-структур с их относительным смещением  $\Delta x = 0.4 \text{ pixel}$ .

На рис. 2, b представлены графики функции линейного фазового набега, возникающего в поле комплексного пространственного спектра смещенной спекл-структуры по отношению к несмещенной: исходный график фазового набега  $I$  и смещенный график из-за дополнительно введенного фазового сдвига  $\Delta\phi = -\pi/20 \text{ rad}$ . Графики на рис. 2, b получены путем усреднения по 600 построчным реализациям вдоль оси  $\eta$  на линейном участке графиков в пределах дифракционного гало (рис. 2, a). Усреднение необходимо для уменьшения случайной шумовой составляющей, возникающей из-за эффектов

некоторой декорреляции спекл-структур, возникающей в оптической системе. Вне области дифракционного гало на пространственное распределение фазового набега оказывают влияние сильные нелинейные модуляции и шумы, в которых теряется информационная составляющая.

Для дискретных распределений комплексной амплитуды в пространственных спектрах исходной и смещенной спекл-структур можно записать следующие выражения [10]:

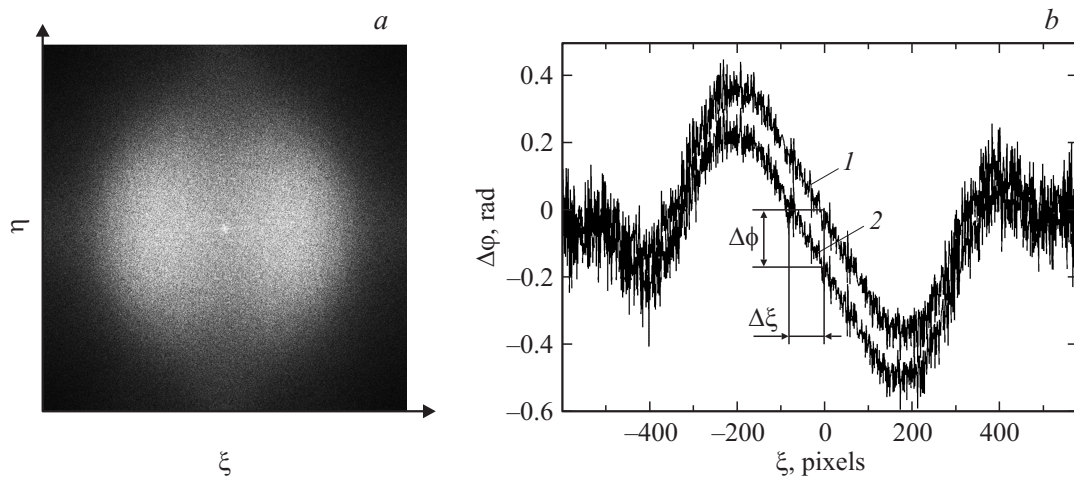
$$F(I_0(x, y)) = \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} I_0(x, y) \exp \left[ i2\pi \left( \frac{x}{M} \xi + \frac{y}{N} \eta \right) \right] = H_0(\xi, \eta),$$

$$F(I_S(x, y)) = \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} I_0(x - \Delta x, y) \times \exp \left[ i2\pi \left( \frac{x}{M} \xi + \frac{y}{N} \eta \right) \right] = H_0(\xi, \eta) \exp \left( i2\pi \frac{\Delta x}{M} \xi \right), \tag{1}$$

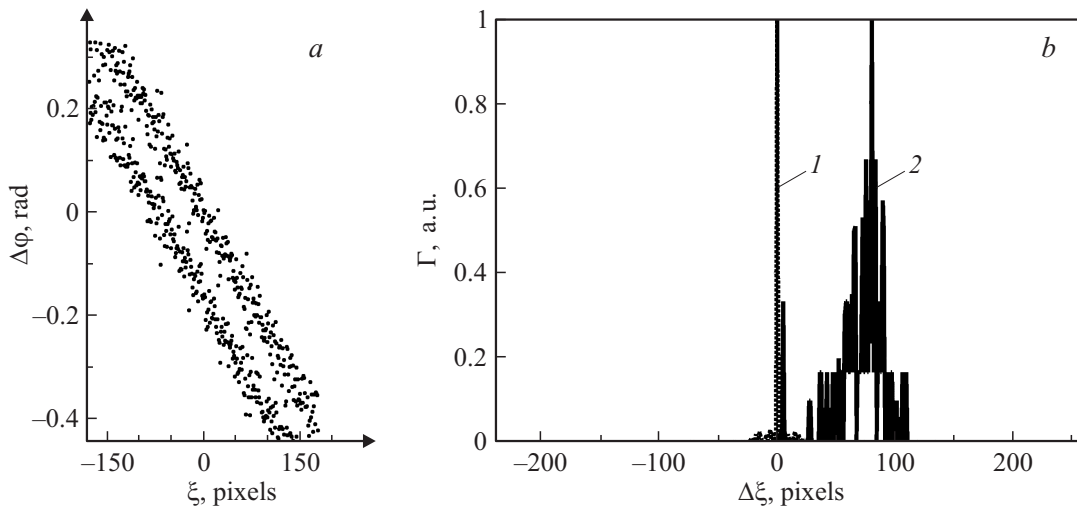
где  $(x, y)$  и  $(\xi, \eta)$  — дискретные координаты соответственно в плоскости спеклограммы и в плоскости пространственного спектра,  $F$  — символ пространственного фурье-преобразования,  $I_0(x, y)$  и  $I_S(x, y)$  — дискретные распределения интенсивности исходной и смещенной спекл-структур,  $H_0(\xi, \eta)$  — комплексная амплитуда поля пространственного спектра исходной спекл-структуры,  $N \times M$  — размер матрицы в количестве пикселей. Из (1) можно получить выражения для функций фазового набега  $\Delta\phi(\xi)$  (рис. 2, b) и определения величины смещения спекл-структуры  $\Delta x$ :

$$\left. \begin{aligned} \Delta\phi_1 &= 2\pi \frac{\Delta x}{M} \xi_1 \\ \Delta\phi_2 &= 2\pi \frac{\Delta x}{M} \xi_2 + \Delta\phi \\ \Delta\phi_1 &= \Delta\phi_2 \end{aligned} \right\} \Rightarrow \Delta x = \frac{\Delta\phi M}{2\pi(\xi_1 - \xi_2)} = \frac{\Delta\phi M}{2\pi\Delta\xi}. \tag{2}$$

Величину  $\Delta\xi$  можно определить с помощью построчного (вдоль  $\xi$ ) корреляционного анализа взаимного смещения точек графиков функций фазового набега (рис. 2, b) на линейном участке вдоль оси  $\xi$ . На рис. 3, a представлен увеличенный фрагмент расположения точек центральной линейной области графиков (рис. 2, b). Определим для обоих графиков (рис. 2, b) функции  $I_1(\xi, \Delta\phi_j)$  и  $I_2(\xi, \Delta\phi_j)$ , зависящие от  $\xi$ , при фиксированной ординате  $\Delta\phi_j$ . Значения этих функций равны единице в точках, принадлежащих графикам, и нулю для остальных точек. Усредненные функции автокорреляции и взаимной корреляции смещения точек вдоль оси  $\xi$ , согласно свойствам преобразования Фурье [10], можно



**Рис. 2.** Разностный пространственный спектр исходной и смещенной спекл-структур на величину  $\Delta x = 0.4$  pixel (*a*); графики функции линейного фазового набега в пределах дифракционного гало, возникающего в поле комплексного пространственного спектра смещенной спекл-структуры (*b*): 1 — без фазового сдвига, 2 — с дополнительным фазовым сдвигом  $\Delta\phi = -\pi/20$  rad.



**Рис. 3.** Точки центральной области графиков фазового набега (*a*); нормированные усредненные корреляционные функции расположения точек графиков функций фазового набега на линейном участке вдоль оси  $\xi$  (*b*): 1 — автокорреляционная функция расположения точек на одном графике, 2 — взаимная корреляционная функция расположения точек на двух графиках.

определить по формулам

$$\begin{aligned} \Gamma_{11}(\Delta\xi) &= \sum_{j=1}^n \sum_{\xi=0}^{M-1} I_1(\xi, \Delta\varphi_j) I_1(\xi - \Delta\xi, \Delta\varphi_j) \\ &= \sum_{j=1}^n F^{-1} \left\{ F(I_1(\xi, \Delta\varphi_j)) \times F^* \{ F(I_1(\xi, \Delta\varphi_j)) \} \right\}, \\ \Gamma_{12}(\Delta\xi) &= \sum_{j=1}^n \sum_{\xi=0}^{M-1} I_1(\xi, \Delta\varphi_j) I_2(\xi - \Delta\xi, \Delta\varphi_j) \\ &= \sum_{j=1}^n F^{-1} \left\{ F(I_1(\xi, \Delta\varphi_j)) \times F^* \{ I_2(\xi, \Delta\varphi_j) \} \right\}, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $F$  и  $F^{-1}$  — прямое и обратное преобразования Фурье,  $*$  — комплексное сопряжение,  $n$  — число строк, по которым производится усреднение  $n = 360$ .

На рис. 3, *b* представлены графики нормированных усредненных корреляционных функций расположения точек функций фазового набега (рис. 3, *a*). Величину  $\Delta\xi$  можно определить по смещению центрального максимума функции взаимной корреляции  $\Gamma_{12}(\Delta\xi)$  относительно максимума автокорреляционной функции  $\Gamma_{11}(\Delta\xi)$  (рис. 3, *b*). В частности, в нашем эксперименте для графиков на рис. 2, *b* была получена величина взаимного смещения графиков вдоль оси  $\xi$   $\Delta\xi \approx 79$  pixel и, учитывая  $M = 1280$  pixel, по формуле (2) можно определить величину смещения спекл-структуры  $\Delta x \approx 0.405$  pixel.

Абсолютную погрешность определения величины смещения спекл-структуры можно получить как раз-

ность между заданным значением 0.4 pixel и, полученным в результате обработки фазовых набегов,  $\delta(\Delta x_p) \approx 0.005$  pixel. С помощью корреляционного метода величину  $\Delta\xi$  можно определить с точностью до одного пикселя,  $\delta(\Delta\xi) = 1$  pixel, тогда абсолютную погрешность  $\Delta x$  можно найти, исходя из формулы (2),  $\delta(\Delta x_p) \approx (\Delta\phi M / 2\pi(\Delta\xi)^2)\delta(\Delta\xi) \approx 0.005$  pixel. Расчетная и полученная в эксперименте погрешности совпадают с хорошей точностью.

Проведение измерений с субпиксельной точностью или в субпиксельном диапазоне при реализации метода цифровой спекл-фотографии, как показывают наши эксперименты, возможно при выполнении численных преобразований спекл-структур в область их пространственных частот. Такая точность достигается на основе определения величин параметров линейного фазового набег, возникающего в поле комплексного пространственного спектра смещенной спекл-структуры, с помощью корреляционного анализа смещения линейного фазового набег, образующегося в пространственном спектре спеклограммы при численном введении дополнительного постоянного фазового сдвига спектра. Чем меньше размеры регистрируемых спеклов, тем больше размер дифракционного гало — шире пространственный спектр, и соответственно больше линейный участок функции фазового набег и, следовательно, выше точность выполняемых измерений.

Предложенный в работе метод реализации интерференционных измерений позволяет определять смещение спекл-структуры в субпиксельном диапазоне и с субпиксельной точностью. Это расширяет диапазон измерений, производимых с помощью метода цифровой спекл-интерферометрии, в сторону малых величин смещений и может быть эффективно использовано в практике измерения малых смещений и деформаций рассеивающих объектов.

## Список литературы

- [1] *Goodman J.W.* Speckle Phenomena in Optics: Theory and Applications. Roberts & Company, Publishers, Englewood, CO, 2006. 387 p.
- [2] *Osten W.* (ed.) Optical inspection of microsystems (Optical Science and Engineering). Taylor & Francis Group, 2007. 503 p.
- [3] *Schnars U., Falldorf C., Watson J., Jueptner W.* Digital Holography and Wavefront Sensing. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 2015. 226 p.
- [4] *Mudassar A.A., Butt S.* // Appl. Opt. 2014. Vol. 53. N 5. P. 960–970.
- [5] *Cofaru C., Philips W., Van Paeppegem W.* // Opt. Express. 2013. Vol. 21. N 24. P. 29979–29999.
- [6] *Grebenyuk A.A., Ryabukho V.P.* // Proc. of SPIE. 2011. Vol. 7999. P. 79990B.
- [7] *Фомин Н.Ф., Мелеева О.В.* // Автометрия. 2012. Т. 48. № 3. С. 82–89.
- [8] *Максимова Л.А., Рябухо П.В., Мысина Н.Ю., Рябухо В.П.* // Изв. Саратовского ун-та. Новая серия. Серия Физика. 2015. Т. 15. Вып. 3. С. 5–11.
- [9] *Lu H., Huang C., Wang C., Wang X., Fu H., Chen Z.* // Appl. Opt. 2014. Vol. 13. P. 2806–2814.
- [10] *Локишин Г.Р.* Основы радиооптики. М.: Интеллект, 2009. 344 с.