



## ФИЗИКА

УДК 535.4:681.7.064.45

### ЦИФРОВАЯ СПЕКЛ-ФОТОГРАФИЯ С КОРРЕЛЯЦИОННОЙ ОБРАБОТКОЙ ПРОСТРАНСТВЕННОГО СПЕКТРА СПЕКЛОГРАММЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МИКРОСМЕЩЕНИЙ РАССЕИВАЮЩЕГО ОБЪЕКТА

Л. А. Максимова<sup>1</sup>, П. В. Рябухо<sup>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, Лаборатория проблем когерентно-оптических измерений в точной механике, Саратов

<sup>2</sup>Саратовский государственный университет

E-mail: MaksimovaLA@yandex.ru

E-mail: ryabukhopeter.optics@yandex.ru

Рассматривается метод цифровой спекл-фотографии для определения смещения спекл-структуры с субпиксельной точностью, вызываемого перемещением или деформацией объекта с рассеивающей поверхностью, с использованием корреляционной обработки суммарного пространственного спектра спекл-структур. Для расширения нижней границы диапазона измерений смещений спекл-структур в область субпиксельных значений предложен метод фазового сдвига интерференционной картины в дифракционном гало, основанный на численно вносимых дополнительных фазовых сдвигах комплексных пространственных спектров смещенной и несмещенной спекл-структур. Представлены результаты численных и натуральных экспериментов.

**Ключевые слова:** спекл-структура, цифровая спекл-фотография, спекл-интерферометрия, дифракционное гало, пространственный спектр, корреляционный анализ, микросмещение.

#### Digital Speckle Photography with Correlation Processing of Spatial Spectrum of Specklegram for Determination of Micro Displacement of Scattering Object

L. A. Maksimova, P. V. Ryabukho, N. Yu. Mysina, V. P. Ryabukho

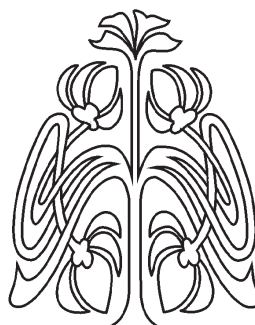
The method of digital speckle photography for determining of speckle pattern displacement with sub-pixel accuracy using correlation processing of summary spatial spectrum of speckle patterns is considered in this article. It is assumed that displacement of speckle pattern is caused by deformation or displacement of an object with a scattering surface. The method of phase shift of interference pattern in diffraction halo is proposed for expanding the lower limit of measuring range of speckle pattern displacement to subpixel values. The method is based on numerical additional phase shifts of complex spatial spectra of displacement and non-displacement speckle patterns. The results of numerical and natural experiments are presented.

**Key words:** speckle-pattern, digital speckle-photography, speckle-interferometry, diffraction halo, spatial spectrum, correlation analysis, micro displacement.

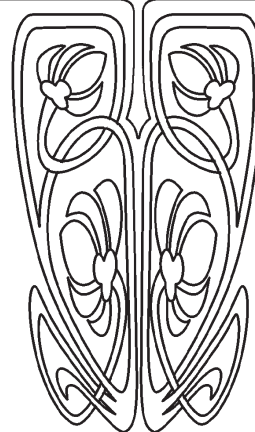
DOI: 10.18500/1817-3020-2015-15-3-5-11

#### Введение

При отражении когерентного лазерного излучения от рассеивающей поверхности объекта или при прохождении через оптически неоднородную среду формируется спекл-модулированное рассеянное поле [1–4]. При регистрации спекл-поля на фотопластинку или



НАУЧНЫЙ  
ОТДЕЛ





матрицу цифровой фотокамеры записывается спеклограмма – распределение интенсивности спекл-поля. Изменения, происходящие с рассеивающими объектами, например микросмещение или деформация его поверхности, отражаются на пространственном распределении интенсивности спекл-поля. С помощью лазерных методов интерферометрии можно определить изменения в спекл-поле и получить измерительную информацию о микросмещениях и деформациях рассеивающих объектов [5–7]. Бесконтактность методов, субмикронное пространственное разрешение и высокое быстродействие определяет широкую перспективу для их использования в прецизионных измерительных технологиях.

При реализации цифровых интерференционных методов спекл-структура рассеянного объектом поля регистрируется на матрицу фотокамеры, межпиксельное расстояние которой в данных методах измерений используется в качестве рабочей меры длины. Однородное поперечное смещение спекл-структуры можно определить с помощью методов цифровой спекл-фотографии по величине линейного фазового набега, возникающего в поле комплексного пространственного спектра смещенной спекл-структуры [8], или путем анализа интерференционной картины, образующейся в дифракционном гало – в суммарном пространственном спектре исходной и смещенной спекл-структур [5–7]. При определении неоднородного смещения, если выделять области спекл-структуры, в которых смещение квазиоднородно, также возможно применение методов двухэкспозиционной спекл-фотографии.

Непосредственное определение вектора поперечного смещения спекл-структуры возможно методом взаимной корреляции смещенной и несмещенной спекл-структур [9–11]. Использование корреляционного метода для определения взаимного смещения спекл-структур имеет много преимуществ, таких как простота реализации, возможность автоматизации процессов измерения, прямое получение информации о смещении спекл-структуры без преобразования в частотную область. Недостатком такого метода является нечувствительность к смещению спекл-структуры на величину меньшую, чем межпиксельное расстояние матрицы цифровой фотокамеры.

В работе предложены и рассматриваются методы численной обработки и анализа комплексных пространственных спектров спекл-структур для определения их микросмещений в субпиксельном диапазоне. В основе данных методов

лежит численное определение фазового набег в пространственном спектре с помощью дополнительных численно введенных фазовых сдвигов и корреляционного анализа интерференционной картины в дифракционном гало.

### **1. Корреляционная обработка пространственного спектра спеклограмм в цифровой спекл-фотографии**

При реализации метода цифровой спекл-фотографии на матрицу цифровой фотокамеры регистрируются спекл-структуры рассеянного объектом поля, соответствующие исходному и смещенному положениям поверхности рассеивающего объекта. На рис. 1 представлены возможные схемы реализации метода цифровой спекл-фотографии отражающих объектов с цифровой фоторегистрацией спекл-структур в плоскости действительного изображения поверхности объекта (см. рис. 1, *а*) и в дифракционной области – в ближней или дальней области дифракции (см. рис. 1, *б*). Первая схема используется для регистрации смещения спекл-структуры в результате поперечных смещений и деформаций поверхности объекта, а вторая – для регистрации смещений дифракционных спекл-структур, вызываемых наклоном поверхности, изгибными деформациями и т.п.

Однородное смещение спекл-структуры относительно ее исходного положения вызывает в комплексном пространственном спектре спекл-структуры линейную фазовую модуляцию, зависящую от величины взаимного смещения спекл-структур. Эта фазовая модуляция проявляется в суммарном пространственном спектре исходной и смещенной спекл-структур – в дифракционном гало, в виде системы интерференционных полос (рис. 2, *а*), период и ориентация которых определяется величиной и направлением взаимного смещения спекл-структур [5–7]. Фазовый набег в дифракционном гало, который определяется величиной смещения спекл-структур  $\Delta x$ , можно установить или методом прямого вычисления разности фаз комплексных полей пространственных спектров спекл-структур, или методом определения параметров интерференционной картины, формируемой в дифракционном гало – в поле суммарного пространственного спектра спеклограмм. Последний метод предпочтительнее, поскольку позволяет визуализировать измерительный сигнал путем формирования изображений интерференционной картины и контролировать процесс определения взаимного смещения спекл-структур.

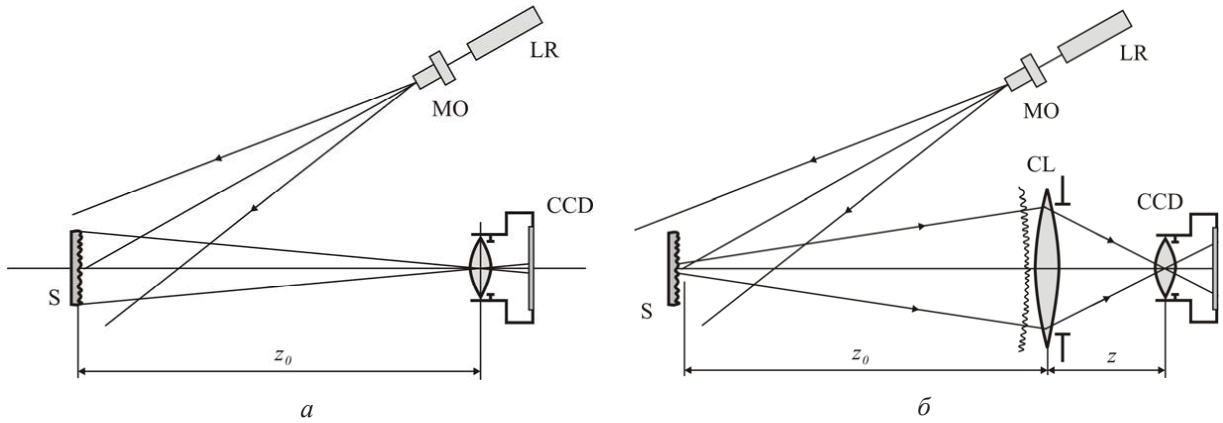


Рис. 1. Оптические схемы записи спеклограмм сфокусированного изображения (а) и дифракционных спеклограмм (б) с использованием цифровой фотокамеры с несъемным штатным объективом: LR – лазер ( $\lambda \approx 0.63$  мкм); MO – микро-объектив ( $20\times$ ,  $NA = 0.4$ ); S – объект; CL – коллективная линза ( $f \approx 75$  мм); CCD – цифровая фотокамера

Прямое определение смещения спекл-структуры реализуется корреляционным способом [9, 10], но этот метод не даёт субпиксельной точности измерений и не действует в диапазоне субпиксельной величины смещений.

Функции автокорреляции и взаимной корреляции спекл-структур можно записать с использованием следующих выражений:

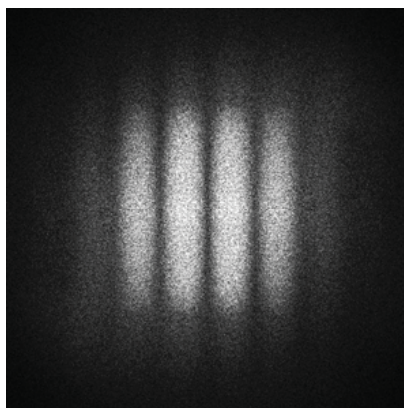
$$\Gamma_0(\Delta x, \Delta y) = \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N I_0(x, y) I_0(x - \Delta x, y - \Delta y); \quad (1)$$

$$\Gamma_S(\Delta x, \Delta y) = \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N I_0(x, y) I_S(x - \Delta x, y - \Delta y),$$

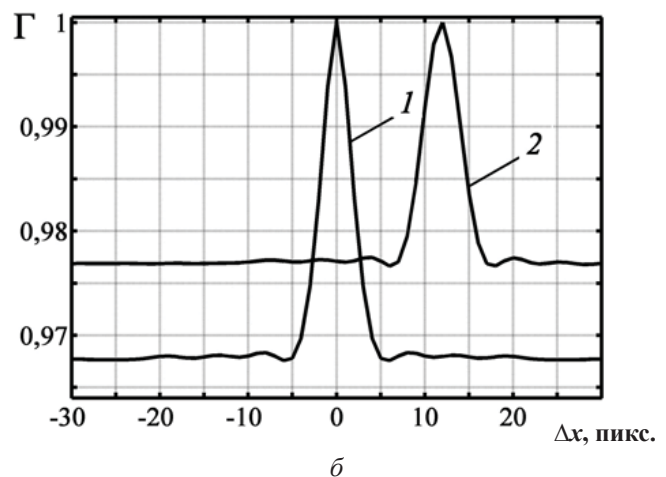
где  $I_0(x, y)$  и  $I_S(x, y)$  – дискретные функции распределения интенсивности в исходной и сме-

щенной спекл-структурах,  $(x, y)$  – дискретные координаты расположения пикселей цифровой матрицы,  $(\Delta x, \Delta y)$  – смещения спекл-структуры по соответствующим координатам;  $N \times M$  – размер матрицы в количестве пикселей.

На рис. 2, б представлены графики нормированных функций автокорреляции распределения интенсивности исходного состояния спекл-структуры  $I_0(x, y)$  и взаимной корреляции распределений интенсивностей исходного и смещённого состояний спекл-структур  $I_0(x, y)$  и  $I_S(x, y)$ . Смещение спекл-структуры в целых числах пикселей можно определить по разности координат между глобальными максимумами этих функций.



а



б

Рис. 2. Интерференционная картина в дифракционном гало (а), полученная в натурном эксперименте ( $\Delta x \approx 12,35$  пикс., период полос  $\Lambda = 81$  пикс.); график функции автокорреляции распределения интенсивности  $I_0(x, y)$  исходного положения спекл-структуры (1) и график функции взаимной корреляции (2) распределений интенсивностей исходного и смещённого положений спекл-структур  $I_0(x, y)$  и  $I_S(x, y)$  при смещении спекл-структуры вдоль оси X на 12 пикселей (б)



Для определения методом цифровой спекл-фотографии смещения спекл-структуры в субпиксельном диапазоне или с субпиксельной точностью возможно использовать подходы, связанные с формированием и обработкой дифракционного гало – суммарного спектра смещенной и несмещенной спеклограмм. В методе цифровой спекл-фотографии можно проводить анализ распределения модуля комплексной амплитуды поля – в этом отличие цифровых методов от аналоговых, в которых работа проводится только с распределениями интенсивности. Это упрощает обработку данных и даёт существенно более чёткие (узкие) минимумы интерференционной картины.

При достаточно большом смещении спекл-структуры, когда дифракционное гало содержит

несколько и много периодов интерференционных полос (см. рис. 2, *a*), величину периода можно определить непосредственно как расстояние между соседними минимумами интерференционной картины. На рис. 3, *a, б* представлено нормированное распределение модуля комплексной амплитуды поля  $H(\xi)$  в дифракционном гало, не усредненное (см. рис. 3, *a*) и усредненное (см. рис. 3, *б*) по 200 строкам в изображении суммарного пространственного спектра спекл-структур вдоль направлений, параллельным интерференционным полосам. В неусредненном распределении (см. рис. 3, *a*) проявляются сильные флуктуации амплитуды поля, обусловленные спекл-модуляцией [12] и существенно снижающие точность определения периода интерференционных полос.

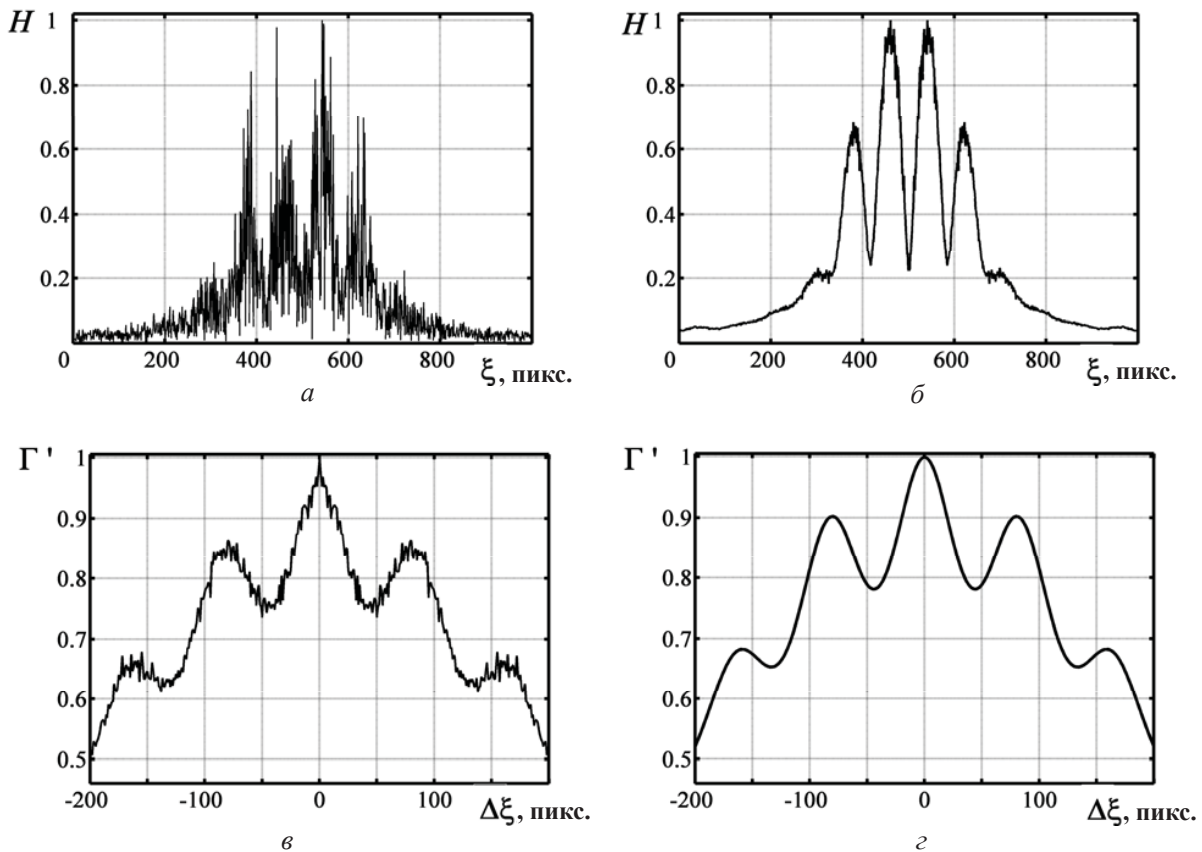


Рис. 3. Распределение амплитуды поля в дифракционном гало (см. рис. 2, *a*) вдоль оси  $\xi$ : *a* – не усредненное; *б* – усредненное по 200 строкам изображения суммарного пространственного спектра. Нормированные функции автокорреляции этих распределений амплитуды поля: *в* – не усредненного; *г* – усредненного; смещение спекл-структуры  $\Delta x \approx 12.35$  пикс.

Для дифракционного гало, полученного в реальном эксперименте, на графике усреднённого распределения амплитуды (рис. 3, *г*) также проявляются некоторые флуктуации, вызванные спеклами, которые снижает точность определения периода интерференционных полос. В автокорреляционной функции распределения

модуля комплексной амплитуды поля в дифракционном гало случайная модуляция существенно меньше (рис. 3, *в, г*). Это позволяет определить с достаточно высокой точностью величину периода интерференционных полос  $\Lambda$  по разности координат глобальных максимумов автокорреляционной функции (рис. 3, *г*).



Функцию автокорреляции распределения модуля комплексной амплитуды поля в дифракционном гало можно записать с использованием следующего выражения:

$$\Gamma'(\Delta\xi, \Delta\eta) = \sum_{\xi=1}^M \sum_{\eta=1}^N |H(\xi, \eta)| |H(\xi - \Delta\xi, \eta - \Delta\eta)|, \quad (2)$$

где  $(\Delta\xi, \Delta\eta)$  – дискретные переменные автокорреляционной функции,  $H(\xi, \eta)$  – дискретная функция распределения комплексной амплитуды поля в дифракционном гало – в комплексном про-

странственном спектре разности спекл-структур,  $(\xi, \eta)$  – дискретные координаты – пространственные частоты, расположения пикселей численной матрицы дифракционного гало;  $N \times M$  – размер матрицы в количестве пикселей.

Для дискретных распределений комплексной амплитуды поля в пространственных спектрах исходной и смещенной спекл-структур, а также в суммарном пространственном спектре разности исходной и смещенной спекл-структур можно записать выражения [13]:

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

$$\begin{aligned} \mathbf{F}\{I_s(x, y)\} &= \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} I_0(x - \Delta x, y) \exp\left[i2\pi\left(\frac{x}{M}\xi + \frac{y}{N}\eta\right)\right] = H_s(\xi, \eta) = \\ &= H_0(\xi, \eta) \exp\left(i2\pi\frac{\Delta x}{M}\xi\right). \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{H}(\xi, \eta) &= \mathbf{F}\{I_0(x, y) - I_s(x, y)\} = \mathbf{F}\{I_0(x, y) - I_0(x - \Delta x, y)\} = \\ &= H_0(\xi, \eta) \left[1 - \exp\left(i2\pi\frac{\Delta x}{M}\xi\right)\right], \end{aligned} \quad (3)$$

где  $\mathbf{F}$  – символ пространственного фурье-преобразования,  $H_0(\xi, \eta) = \mathbf{F}\{I_0(x, y)\}$  и  $H_s(\xi, \eta) = \mathbf{F}\{I_s(x, y)\}$  – комплексные амплитуды пространственных спектров исходной и смещенной спекл-структур.

Таким образом, для модуля комплексной амплитуды суммарного пространственного спектра спекл-структур получаем:

$$|\mathbf{H}(\xi, \eta)| = |H_0(\xi, \eta)| 2 \left| \sin\left(\pi\frac{\Delta x}{M}\xi\right) \right|. \quad (4)$$

Выражение (4) для суммарного амплитудного спектра спекл-структур определяет зависимость периода интерференционных полос от величины взаимного смещения спекл-структур  $\Delta x$  и соответственно позволяет получить выражение для вычисления величины смещения спекл-структуры по величине периода полос, определяемой в результате корреляционной обработки согласно (2) интерференционной картины в дифракционном гало

$$\pi\frac{\Delta x}{M}\Lambda = \pi \Rightarrow \Delta x = \frac{M}{\Lambda}. \quad (5)$$

Определяя  $\Lambda = 81$  пикс. по графику на рис. 3,  $g$  для дифракционного гало на рис. 2,  $a$  и учитывая размер матрицы  $M \times N = 1000 \times 1000$  пикселей, можно определить величину смещения спекл-структуры по формуле (5),  $\Delta x \approx$

$\approx 12,35$  пикс. Период интерференционных полос в пространственном спектре определяется с помощью корреляционного метода с точностью до одного межпиксельного расстояния  $\delta(\Lambda) \approx \approx 1$  пикс. В этом случае абсолютная погрешность определения смещения спекл-структуры составляет  $\delta(\Delta x) \approx (M/\Lambda^2) \delta\Lambda \approx 0,15$  пикс., тогда как корреляционный анализ непосредственно спекл-структур позволяет определить их взаимное смещение только с абсолютной погрешностью  $\delta(\Delta x) \approx 1$  пикс.

Таким образом, использование в методе цифровой спекл-фотографии корреляционного анализа суммарного пространственного спектра спеклограмм позволяет уменьшить абсолютную погрешность в определении смещения спекл-структуры до субпиксельных значений.

## 2. Метод фазового сдвига интерференционной картины в дифракционном гало

При малом смещении спекл-структуры, когда в пределах дифракционного гало оказывается только один минимум интерференционной картины (рис. 4,  $a$ ), для определения периода интерференционных полос  $\Lambda$  можно использовать метод фазового сдвига интерференционной картины. В этом методе численно задаётся до-



полнительный фазовый сдвиг комплексного пространственного спектра исходной или смещенной спекл-структуры и тем самым задается смещение в целом интерференционной картины

в пределах дифракционного гало на известную часть периода полос, и определяется число отсчетов, соответствующее этой части периода полос.

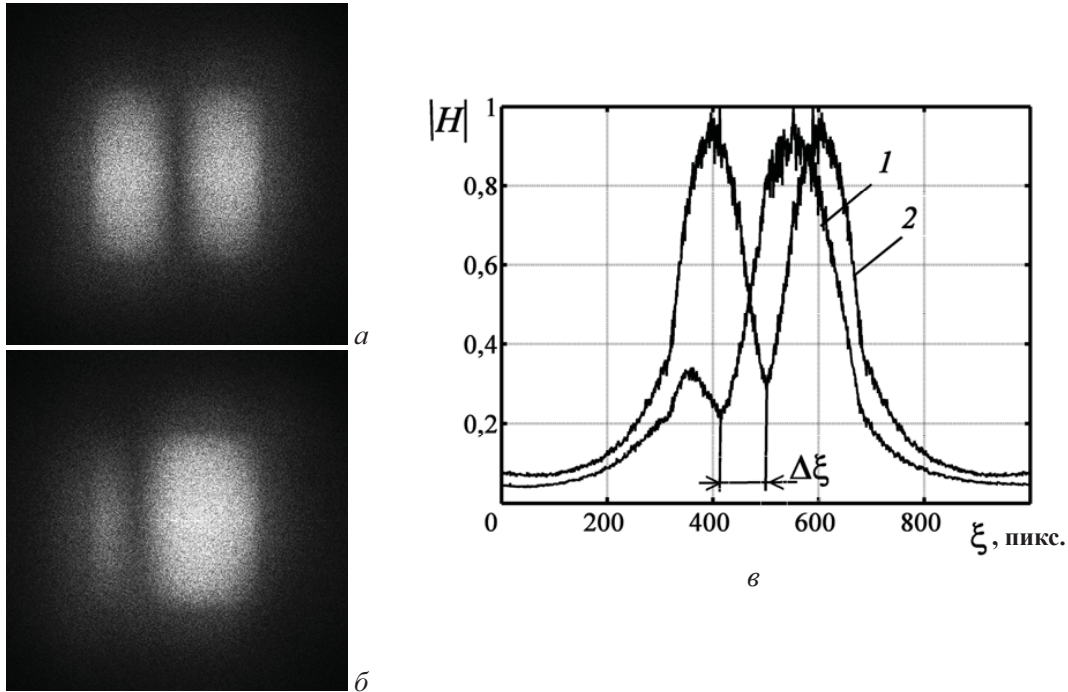


Рис. 4. Интерференционные картины в дифракционном гало: *a* – исходная; *b* – смещенная на четверть периода ( $\Delta\phi = \pi/4$ ); *v* – распределение амплитуды в дифракционном гало вдоль оси  $\xi$ , усредненное по 200 строкам интерференционной картины: 1 – исходное; 2 – смещенное на четверть периода полос;  $\Delta\xi = \Lambda / 4 = 81$  пикс.,  $\Lambda \approx 324$  пикс.,  $\Delta x \approx 3,09$  пикс.

Для численного задания фазового сдвига в пространственном спектре каждый элемент матрицы спекл-структуры необходимо умножить на постоянный фазовый множитель  $\exp(i\Delta\phi)$  с заданной величиной фазового сдвига  $0 < \Delta\phi < \pi$ . В результате численного преобразования Фурье матрицы разности спекл-структур формируется дифракционное гало, в котором минимум (темная полоса) интерференционной картины смещен на часть периода полос  $\Delta\xi = (\Delta\phi/2\pi)\Lambda$  (рис. 4, б) относительно исходного положения темной полосы в центре дифракционного гало (рис. 4, а) в отсутствие фазового сдвига  $\Delta\phi = 0$ . Определяя величину смещения  $\Delta\xi$ , можно определить период интерференционных полос  $\Lambda$  и, учитывая выражения (5), определить величину взаимного смещения спекл-структур  $\Delta x$ :

$$\left. \begin{aligned} \Lambda &= \frac{2\pi\Delta\xi}{\Delta\phi} \\ \Lambda &= \frac{M}{\Delta x} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \Delta x = \frac{M\Delta\phi}{2\pi\Delta\xi} \quad (6)$$

На рис. 4, в представлены графики распределения нормированной амплитуды поля в дифракционном гало (рис. 4, а, б) перпендикулярно полосам, усредненным по 200 строкам в направлении полос. Определяя величину смещения темной интерференционной полосы в дифракционном гало  $\Delta\xi$  по распределениям амплитуды (на рис. 4, в), с использованием формулы (6) можно определить величину смещения спекл-структуры  $\Delta x$  с точностью до долей межпиксельного расстояния.

Из анализа рис. 4 четвертая часть периода интерференционных полос ( $\Lambda / 4 = 81$  пикс.) определяется с точностью до одного межпиксельного расстояния; размер полного периода  $\Lambda \approx 324$  пикс. в данном случае определяется с точностью до четырёх межпиксельных расстояний  $\delta\Lambda = 4$  пикс. Подставляя все известные значения в формулу (6), получаем величину смещения спекл-структуры, равную  $\Delta x = 3,09$  пикс. В этом случае абсолютная погрешность определения смещения спекл-структуры составляет  $\delta(\Delta x) \approx (M/\Lambda^2)\delta\Lambda \approx 0,04$  пикс.



## Заключение

Прямой корреляционный анализ взаимного смещения изображений спекл-структур позволяет определить величину смещения с точностью до одного межпиксельного расстояния. Для измерений с субпиксельной точностью или в субпиксельном диапазоне необходимо при реализации метода цифровой спекл-фотографии выполнять численные преобразования спекл-структур в область их пространственных частот и определять период интерференционной модуляции суммарного спектра спекл-структур. Период интерференционных полос в пространственном спектре спекл-структур можно определить корреляционным способом по положению максимумов автокорреляционной функции распределения амплитуды поля в дифракционном гало. Для малых смещений спекл-структуры, когда в дифракционном гало формируется только один минимум интерференционной картины, период интерференционных полос можно определить с помощью метода фазового сдвига, в котором численным способом задаётся смещение центрального минимума интерференционной картины на заданную часть периода интерференционных полос.

Предложенные в работе методы анализа и обработки пространственного спектра спекл-структур позволяют определять смещение спекл-структуры в субпиксельном диапазоне, а также с субпиксельной точностью в интервале относительно больших взаимных микросмещений спекл-структур. Это существенно расширяет диапазон измерений, производимых с помощью метода цифровой спекл-фотографии, в сторону малых величин смещений рассеивающего объекта и может быть эффективно использовано в практике измерения малых смещений и деформаций рассеивающих объектов.

*Исследования проведены при частичной финансовой поддержке гранта Президента РФ для государственной поддержки ведущих научных школ РФ НШ-703.2014.2 (2014–2015 гг).*

## Список литературы

1. Франсон М. Оптика спеклов / пер. с англ. М. : Мир, 1980. 171 с.
2. Goodman J. W. Speckle Phenomena in Optics : Theory and Applications, Roberts & Company, Publishers, Englewood, CO, 2006. 387 p.
3. Джоунс Р., Уайкс К. Голографическая и спекл-интерферометрия / пер. с англ. М. : Мир, 1986. 328 с.
4. Клименко И. С. Голография сфокусированных изображений и спекл-интерферометрия. М. : Наука, 1985. 224 с.
5. Горбатенко Б. Б., Гребенюк А. А., Максимова Л. А., Перепелицына О. А., Рябухо В. П. Спекл-фотография и голографическая интерферометрия с цифровой записью дифракционного поля в фурье-плоскости // Компьютерная оптика. 2010. Т. 34, № 1. С. 69–81.
6. Максимова Л. А., Мысина Н. Ю., Гребенюк А. А., Горбатенко Б. Б., Рябухо В. П. Метод цифровой лазерной спекл-фотографии для измерения микроперемещений рассеивающих объектов // Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Физика. 2011. Т. 11, вып. 2. С. 40–45.
7. Горбатенко Б. Б., Рябухо В. П., Гребенюк А. А., Мысина Н. Ю., Максимова Л. А. Контроль микроперемещений методами цифровой голографической и спекл-интерферометрии // Вестн. СГТУ. 2010. № 4(49), вып. 1. С. 14–24.
8. Lu H., Huang C., Wang C., Wang X., Fu H., Chen Z. Fast and noninterpolating method for subpixel displacement analysis of digital speckle images using phase shifts of spatial frequency spectra // Appl. Opt. 2014. Vol. 13. P. 2806–2814.
9. Nguyen T. N., Huntley J. M., Burguete R. L., Coggrave C. R. Shape and displacement measurement of discontinuous surfaces by combining fringe projection and digital image correlation // Opt. Eng. 2011. Vol. 50. P. 101505.
10. Malesa M., Kujawinska M. Modified two-dimensional digital image correlation method with capability of merging of data distributed in time // Appl. Opt. 2012. Vol. 51. P. 8641–8655.
11. Grebenyuk A. A., Ryabukho V. P. Digital image correlation with fast Fourier transform for large displacement measurement // Proceedings of SPIE. 2010. Vol. 7999. P. 79990B-1–79990B-5.
12. Ryabukho V. P., Klimenko I. S., Golubentseva L. I. Interference of laser speckle fields // Proc. SPIE : New Techniques and Analysis in Optical Measurements. 1994. Vol. 2340. P. 513–522.
13. Гудмен Дж. Введение в фурье-оптику / пер. с англ. М. : Мир, 1970. 364 с.