

СПЕКЛ-ФОТОГРАФИЯ И ГОЛОГРАФИЧЕСКАЯ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЯ С ЦИФРОВОЙ ЗАПИСЬЮ ДИФРАКЦИОННОГО ПОЛЯ В ФУРЬЕ-ПЛОСКОСТИ

*Борис Борисович Горбатенко¹ (доцент кафедры, e-mail: gorbor@pochta.ru),
Антон Александрович Гребенюк² (студент, e-mail: GrebenyukAA@yandex.ru),
Людмила Александровна Максимова³ (с.н.с., e-mail: MaksimovaLA@yandex.ru),
Ольга Александровна Перепелицына^{2,3} (доцент кафедры, e-mail: perepelitsina@optics.sgu.ru),
Владимир Петрович Рябухо^{2,3} (профессор кафедры, заведующий лабораторией, e-mail: rvp@sgu.ru)*
¹ Саратовский технический университет,
² Саратовский государственный университет,
³ Институт проблем точной механики и управления РАН

Аннотация

Рассматриваются методы двухэкспозиционной спекл-фотографии с цифровой записью спекл-структуры дифракционного поля в дальней области дифракции и метод голографической интерферометрии с записью цифровой фурье-голограммы для измерения микросмещений отражающих рассеивающих объектов. Выполнено компьютерное моделирование процессов записи спеклограмм, формирования дифракционных гало с модулирующими интерференционными полосами, отражающими смещение объекта. Показано, что численная нормировка распределения интенсивности в дифракционном гало позволяет увеличить точность измерений. Сравнительный анализ метрологических возможностей рассматриваемых методов показывает более низкий порог чувствительности метода спекл-фотографии по сравнению с методом голографической интерферометрии. Установлено, что нелинейная обработка цифровых спеклограмм, расширяющая дифракционное гало, позволяет существенно снизить порог чувствительности методов. Выполнены натурные эксперименты с использованием цифровых методов спекл-фотографии и голографической интерферометрии с записью дифракционного поля в фурье-плоскости.

Ключевые слова: спекл-структура, цифровая спекл-фотография, дифракция, дифракционное гало, фурье-спеклограмма, пространственный спектр, цифровая фурье-голография, голографическая интерферометрия.

Введение

Высокоразрешающие цифровые средства записи когерентных оптических изображений позволяют реализовать в численной форме голографические процессы и методы интерференционных измерений [1-9]. С использованием компьютерных средств возможно не только восстановление и визуализация изображений, но и формирование изображений, модулированных интерференционными полосами. Иными словами, возможна реализация процессов, аналогичных интерференционным процессам в аналоговых оптических системах. К таким интерференционным методам относятся, в первую очередь, цифровая корреляционная спекл-интерферометрия, двухэкспозиционная спекл-фотография и голографическая интерферометрия [10-16]. Увеличение разрешающей способности цифровых средств записи изображений обеспечило возможность записи цифровых голограмм и, следовательно, возможность реализации цифровой голографической интерферометрии рассеивающих объектов [5]. Естественным развитием подобных цифровых методов в когерентной оптике является реализация метода двухэкспозиционной спекл-фотографии с цифровой записью спекл-модулированных изображений и численной процедурой формирования картины интерференционных полос, отражающих величину и направление измеряемого смещения рассеивающего объекта [2,5].

В настоящей работе рассматриваются методы цифровой спекл-фотографии в фурье-плоскости для определения малых смещений рассеивающего объекта – наклонов и поворотов на малый угол. Проводится сравнительный анализ с методом цифровой голографической интерферометрии с регистрацией голограмм в фурье-плоскости и сопоставляются измерительные возможности этих двух цифровых методов измерений. Рассматриваются возможности увеличения точности и диапазона измерения путем апостериорной обработки цифровых спеклограмм и голограмм.

1. Спекл-фотография в фурье-плоскости

Метод двухэкспозиционной спекл-фотографии [10,13,14], предназначенный для измерения малых смещений и деформаций объектов с рассеивающей поверхностью, основан на определении величины смещения спеклов или в плоскости изображения поверхности объекта, или в дифракционном поле. В аналоговом варианте этого метода на фотопластинку или на какую-либо другую высокоразрешающую фоточувствительную среду записываются последовательно спекл-модулированные картины в исходном и смещенном состояниях рассеивающего объекта. Смещение спеклов определяются по параметрам картины интерференционных полос, наблюдаемых в дифракционном гало, образующемся при ос-

вещении фрагмента спеклограммы лазерным пучком с малой апертурой (рис. 1а). В другом варианте интерференционные полосы наблюдаются в плоскости изображения двухэкспозиционной спеклограммы, формируемого путем пространственно-частотной фильтрации спеклограммы в когерентно-оптическом процессоре (рис. 1б) [10,13].

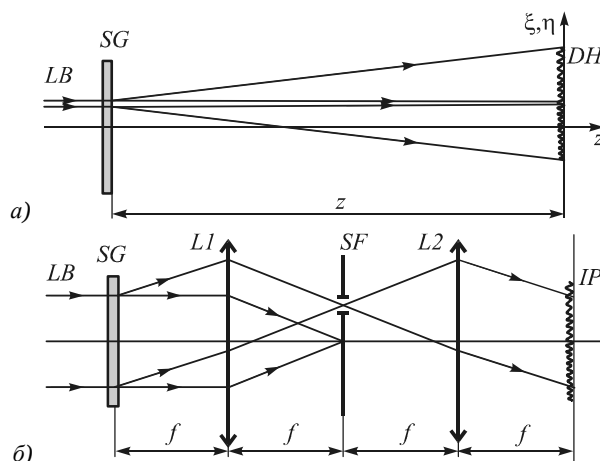


Рис. 1. Схемы формирования интерференционной картины в дальнем поле дифракции лазерного пучка на двухэкспозиционной спеклограмме (а) и путем пространственно-частотной фильтрации поля, рассеянного спеклограммой (б): LB – лазерный пучок; SG – спеклограмма; DH – дифракционное гало с интерференционными полосами в дальней области дифракции; L1 и L2 – собирающие линзы; SF – пространственный фильтр; IP – интерференционная картина в плоскости изображения спеклограммы

При регистрации спекл-картин в плоскости сфокусированного изображения объекта этими методами определяются поперечные (тангенциальные) смещения поверхности объекта. Нормальные смещения поверхности не вызывают достаточных сдвигов спекл-структуры изображения по отношению к продольным размерам спеклов. Для измерения таких смещений необходима регистрация спекл-структуры в дифракционном поле – в области расфокусированного изображения – в ближней или в дальней (в фурье-плоскости) областях дифракции. В этих случаях смещение спеклов на спеклограмме определяется величиной или локального угла наклона поверхности объекта при регистрации в ближней области дифракции, или наклона объекта как целого при регистрации в фурье-плоскости. Вращение объекта в собственной плоскости вызывает вращательное движение спекл-структуры и в ближней, и в дальней областях дифракции и поэтому также может быть измерено методом спекл-фотографии в фурье-плоскости.

Рассмотренные аналоговые методы двухэкспозиционной спекл-фотографии могут быть эффективно реализованы с использованием средств цифровой записи спекл-модулированных картин и соответствующих процедур численной обработки полученных цифровых изображений. В рамках этого подхода записываются цифровые кадры или сфоку-

сированного изображения объекта, или его дифракционного поля в исходном, а затем в смещенном состояниях. Численная обработка полученных цифровых спекл-модулированных изображений может быть выполнена двумя способами, соответствующими вышеописанным аналоговым процедурам обработки двухэкспозиционных спеклограмм.

По первому способу в каждом цифровом кадре выбираются одинаковые по расположению и размеру фрагменты изображения, в которых взаимное смещение спеклов можно считать в определенном приближении однородным. Далее вычисляется пространственный спектр алгебраической суммы этих фрагментов и формируется соответствующий кадр изображения этого спектра, в котором наблюдается пространственная модуляция, аналогичная интерференционной модуляции дифракционного гало в аналоговом методе спекл-фотографии. Параметры полос модуляции – период и пространственная ориентация полос, определяются, соответственно, величиной и направлением взаимного смещения спеклов в выбранных фрагментах кадров изображений.

По второму способу численной обработки записанных спекл-картин выполняется фурье-преобразование от суммы кадров. Полученный пространственный спектр подвергается узкополосной пространственной фильтрации с помощью окна достаточно малых размеров, определяемых величиной фазовой модуляции и характером взаимного смещения спеклов в кадрах. Отфильтрованный фрагмент пространственного спектра подвергается еще раз фурье-преобразованию для восстановления изображения суммарной спеклограммы, которое оказывается модулированным интерференционными полосами с параметрами модуляции, определяемыми типом и величиной взаимного смещения спеклов в спеклограмме.

Вышеописанные численные процедуры применимы для цифровой записи спеклограмм как в плоскости сфокусированного изображения объекта, так и в расфокусированной зоне, и в области дифракции дальнего поля, когда реализуется запись фурье-спеклограммы [17-20].

2. Компьютерное моделирование метода спекл-фотографии в фурье-плоскости

Задачей методов спекл-фотографии является контроль деформаций, изменений в положении и ориентации рассеивающего объекта. Метрологическая проверка этих методов требует более высокой точности определения параметров деформаций и перемещений объекта какими-либо другими методами. Высокая точность требуется для исследования погрешности метода измерений искомых параметров при той или иной обработке записанных спеклограмм. Поэтому для исследования эффективности различных методов обработки цифровых спеклограмм целесообразно использовать компьютерное

моделирование. В этом случае, с точностью до вычислительной погрешности, которую можно сделать достаточно малой, известны величины смещений объекта и параметры схемы записи спеклограмм. Критерием правильности работы модели является физический эксперимент. Однако если работа модели согласуется с экспериментом с точностью до полной погрешности эксперимента, естественно полагать, что систематическая погрешность моделирования практически отсутствует.

Нами выполнено компьютерное моделирование процессов двухэкспозиционной спекл-фотографии наклона (из исходной плоскости) и вращения (в исходной плоскости) объекта с записью объектного поля в фурье-плоскости. Процедура численного моделирования метода двухэкспозиционной спекл-фотографии в фурье-плоскости включала следующие этапы (рис. 2): (1) задание объектного поля, (2) моделирование изменений объектного поля, соответствующих изменению положения объекта, (3) формирование фурье-спеклограмм объекта в исходном и смещенном состояниях (4); формирование пространственного спектра мощности двухэкспозиционной (суммарной) фурье-спеклограммы (целой или малого участка) – дифракционного гало, модулированного интерференционными полосами.

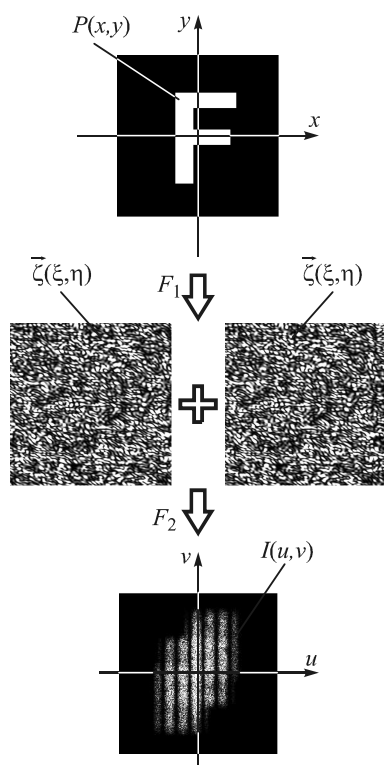


Рис. 2. Схема модели процесса записи двухэкспозиционной фурье-спеклограммы и формирования дифракционного гало, модулированного интерференционными полосами

Комплексная амплитуда объектного поля задавалась в виде дискретного массива $U_0(i, j)$ независимых круговых гауссовых случайных величин [21,22], модулированного апертурной функцией

$P(i, j)$ требуемой формы. Для каждого элемента (i, j) матрицы U_0 вычислялись две независимые случайные вещественные нормально распределенные (гауссовы) величины g_r и g_i с одинаковой дисперсией, и комплексная амплитуда объектного поля определялась в виде:

$$U(i, j) = (g_r + i g_i) P(i, j), \quad (1)$$

где бинарная апертурная функция объекта $P(i, j)$ определяет его границы, принимая значение 1 в пределах объекта и 0 за его пределами.

При освещении прозрачного рассеивающего объекта на просвет наклон его из исходной плоскости на малый угол практически не приводит к изменению дифракционного волнового поля объекта по сравнению с исходным состоянием. При освещении на отражение под углом падения γ , наклон объекта из исходной плоскости на угол α эквивалентен изменению фазы поля в плоскости объекта [12,13,23]

$$\Delta\phi(x) = kx\alpha(1 + \cos \gamma), \quad (2)$$

где $k = 2\pi/\lambda$, λ – длина волны, x – координата поверхности объекта в направлении, перпендикулярном оси наклона.

При моделировании поворота объекта в плоскости для каждой точки матрицы объектного поля $U(i, j)$ после поворота вычислялись ее прежние координаты и этой точке приписывалось соответствующее значение из исходной матрицы.

На следующем этапе производилось моделирование записи фурье-спеклограмм объекта в исходном состоянии и после наклона (или поворота) в предположении о линейном отклике ПЗС-матрицы. В этом случае отклик приемника в данной точке пропорционален значению интенсивности дифракционного объектного поля, определяемого фурье-преобразованием комплексной амплитуды поля в плоскости объекта:

$$I(\xi, \eta) = |F\{U(x, y)\}|^2 = \left| \int \int U(x, y) \exp(i2\pi(x\xi + \eta y)) dx dy \right|^2. \quad (3)$$

Сумма фурье-спеклограмм объекта в исходном и смещенном состояниях определяет двухэкспозиционную фурье-спеклограмму.

Наклон объекта из исходной плоскости и соответствующая линейная модуляция фазы объектного поля (2) согласно свойству фурье-преобразования [23,24] приводит к однородному смещению всей спекл-структуры дифракционного поля:

$$F\{U(x) \exp(ik\alpha(1 + \cos \gamma)x)\} = U(\xi + \alpha(1 + \cos \gamma)/\lambda). \quad (4)$$

Поэтому квадрат модуля фурье-образа суммы спеклограмм, соответствующих исходному и сме-

шенному положению объекта, по тому же свойству фурье-преобразования дает дифракционное гало, модулированное интерференционными полосами

$$\begin{aligned}
 I(u, v) &= \\
 &=^2 \left| F \left\{ \left| U_0(x, y) \right|^2 + \right. \right. \\
 &+ \left. \left| U_0(x, y) \exp(ik\alpha(1 + \cos \gamma)x) \right|^2 \right\} \right|^2 = \\
 &= \left| F \left\{ \left(\left| U(\xi, \eta) \right|^2 + \left| U(\xi - \alpha(1 + \cos \gamma)/\lambda, \eta) \right|^2 \right) \right\} \right|^2 = \quad (5) \\
 &= \left| F \left\{ (I(\xi, \eta) + I(\xi - \alpha(1 + \cos \gamma)/\lambda, \eta)) \right\} \right|^2 = \\
 &= I_1(u, v) \left[1 + \cos \left(\frac{2\pi}{\Lambda} u \right) \right],
 \end{aligned}$$

где $I_1(u, v)$ – дифракционное гало (пространственный спектр одиночной спеклограммы), Λ – период полос модуляции, определяемый углом наклона объекта

$$\Lambda = \frac{\lambda}{\alpha(1 + \cos \gamma)}. \quad (6)$$

При моделировании процедуры спекл-фотографии наклона объекта мы полагали, что отсутствуют какие-либо процессы декорреляции записываемых спекл-структур. Поэтому имеем единичный контраст полос модуляции дифракционного гало, определяемого выражением (5).

Результаты моделирования двухэкспозиционной спекл-фотографии наклона объекта с круговой апертурной функцией $P(x, y)$ диаметром 8 мм на угол $\alpha = 0,5$ угл. мин. приведены на рис. 3.

При повороте объекта в собственной плоскости на малый угол ω смещение спекл-структуры дифракционного объектного поля неоднородно. Поэтому для наблюдения полос в дифракционном гало необходима пространственная фильтрация фурье-спеклограмм, что можно выполнить путем суммирования и дифракционного преобразования небольших участков спеклограмм, в пределах которых относительное смещение спеклов приблизительно однородно. Полосы в дифракционном гало несут информацию о линейном смещении спеклов в исследуемом участке спеклограммы, а сами полосы ориентированы на центр вращения (рис. 4). По параметрам полос в дифракционных гало различных участков спеклограммы можно определить угол поворота объекта и положение центра вращения. На рис. 4 представлены результаты моделирования процесса формирования дифракционного гало с интерференционными полосами при повороте объекта в собственной плоскости на 1° .

При повороте объекта в собственной плоскости дифракционные гало спеклограмм, соответствующих каждой экспозиции, оказываются в значительной степени взаимно декоррелированными [12,13,25].

Поэтому полосы модуляции в дифракционном гало суммарной спеклограммы (рис. 4в, е) имеют низкий контраст, определяемый степенью декорреляции.

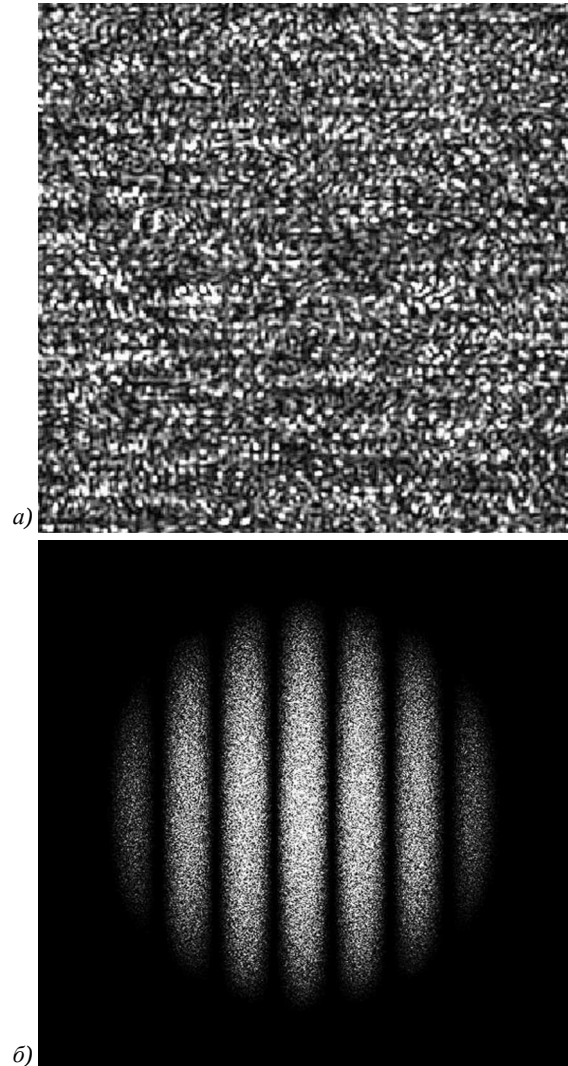


Рис. 3. Результаты моделирования спекл-фотографии наклона объекта из плоскости: фрагмент двухэкспозиционной фурье-спеклограммы (а); соответствующее дифракционное гало с интерференционными полосами (б)

2.1. Нормировка дифракционного гало

В [18,20] получено аналитическое выражение для распределения интенсивности поля в дифракционном гало – пространственном спектре цифровой спеклограммы. Это распределение имеет узкий пик $F(\vec{u})$ (квадрат модуля фурье-образа апертуры используемой ПЗС-матрицы или ее области) на фоне автокорреляции апертурной функции объекта $P(\vec{r})$:

$$\langle I(\vec{u}) \rangle = F(\vec{u}) + K \int_{-\infty}^{\infty} P(\vec{r} + \vec{u}/2) P(\vec{r} - \vec{u}/2) d\vec{r}, \quad (7)$$

где K – коэффициент пропорциональности.

Знание апертурной функции объекта $P(\vec{r})$ дает возможность апостериорно выровнять распределе-

ние интенсивности в дифракционном гало, сделав его среднюю интенсивность равномерной по всей его площади. Это производится делением значения интенсивности в каждой точке дифракционного гало на соответствующее значение нормировочной функции. Поскольку в эксперименте величина центрального пика интенсивности определяется также посторонней засветкой, можно либо предварительно измерить соотношение величины пика и плавного распределения средней интенсивности в экспериментальном дифракционном гало, либо использовать только второе слагаемое (7) в качестве нормировочной функции.

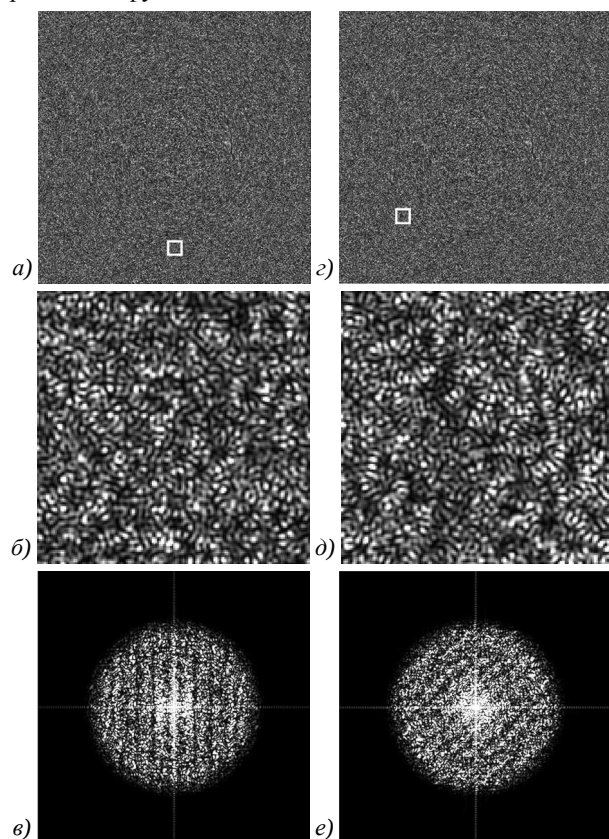


Рис. 4. Результаты моделирования поворота объекта в исходной плоскости: выделение участка исходной двухэкспозиционной спеклограммы, используемого для дифракционного преобразования (центр вращения спеклограммы находится в ее центре) (а,с); выделенные участки спеклограмм (б,д); дифракционные гало, соответствующие выделенным участкам б) и д) (е,е)

Подобного эффекта выравнивания распределения интенсивности в дифракционном гало зачастую стараются добиться, используя в эксперименте апертурную функцию специфической формы, в частности, кольцевую вместо круговой [26, 27], однако это не приводит к достаточному выравниванию средней интенсивности в дифракционном гало. На рис. 5 представлены дифракционные гало с интерференционными полосами, нормированные при помощи функции, описываемой вторым слагаемым в (7).

Графики одномерного распределения интенсивности в дифракционном гало (после соответствующей

щей низкочастотной фильтрации), иллюстрирующие влияние использования нормировочной функции на точность определения периода, представлены на рис. 6. Из рис. 6 в,г видно, что использование нормировочной функции позволяет отличить экстремумы интерференционных полос от случайных флуктуаций интенсивности в случае частичной декорреляции интерферирующих полей.

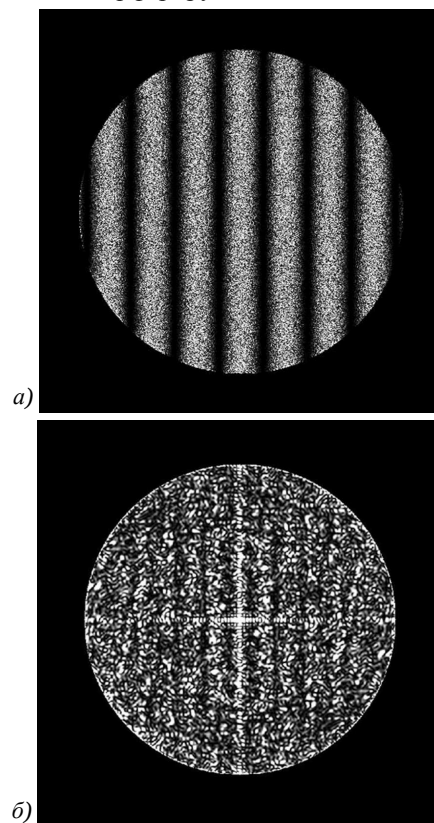


Рис. 5. Дифракционные гало, нормированные при помощи функции, описываемой вторым слагаемым в (7): а) при наклоне объекта из исходной плоскости (исходная интерферограмма показана на рис. 3 б)); б) при повороте объекта в исходной плоскости (исходная интерферограмма показана на рис. 4 в))

Исследование влияния использования нормировочной функции на точность определения периода полос производилось на примере наклона объекта из исходной плоскости. Период полос определялся по максимумам и по минимумам при значениях угла поворота 0,25, 0,5 и 1 мин. Получены следующие результаты: (а) период полос определяется по нормированному дифракционному гало точнее, чем по ненормированному, или с той же точностью; (б) определение периода по минимумам полос производится точнее, чем по максимумам или с той же точностью.

Эти результаты можно объяснить следующим образом. Распределение интенсивности в ненормированном дифракционном гало есть произведение функции (7) на квадрат косинуса (см. (5)). Соответственно, локальный максимум произведения двух функций оказывается смещенным относительно

максимума одной из них; при нормировке эта модуляция пропадает и точность ограничивается случайностью спекл-картины. Среднее квадратичное отклонение интенсивности в спекл-картине примерно равно средней интенсивности [10, 21, 22]; следовательно, вероятность смещения при фильтрации максимума полосы относительно его истинного положения больше, чем вероятность смещения минимума.

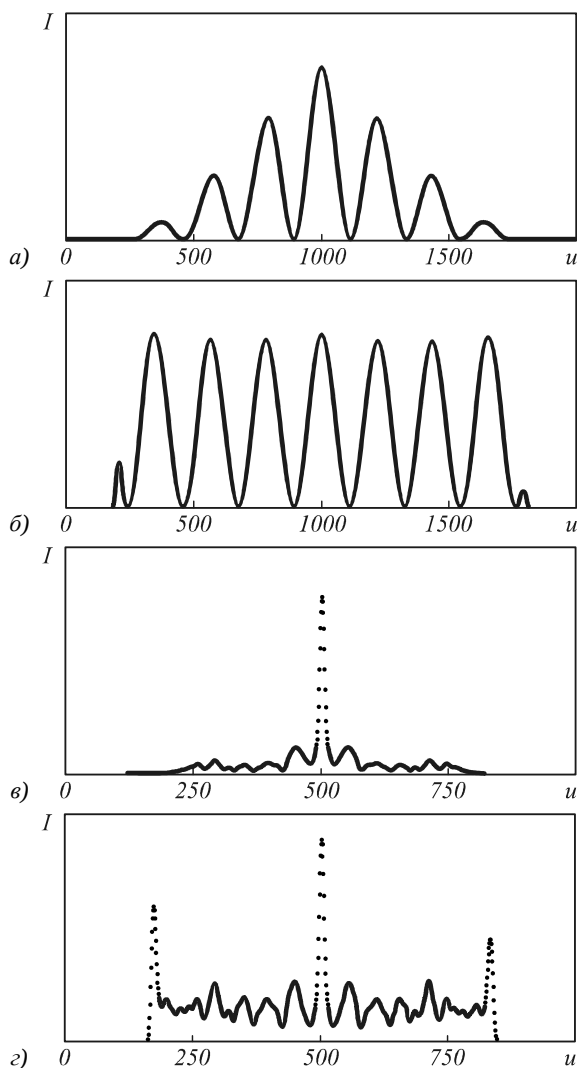


Рис. 6. Одномерные распределения интенсивности в дифракционном гало при наклоне объекта из исходной плоскости (а, б) и при повороте в исходной плоскости (в, г) без использования нормировочной функции (а, в) и с использованием нормировочной функции (б, г)

2.2. Нелинейное преобразование спеклограмм

В эксперименте условие линейности отклика ПЗС-матрицы может нарушаться, приводя к изменениям размера и формы дифракционного гало. Кроме того, в цифровой спекл-фотографии возможна специальная численная нелинейная обработка спеклограмм.

При моделировании мы использовали нелинейное преобразование спеклограмм с помощью функции x^2 . На рис. 7а представлено дифракционное гало, полученное в результате нелинейной обработки

одноэкспозиционных спеклограмм наклона поверхности объекта. Наблюдается заметное расширение дифракционного гало по сравнению с дифракционным гало линейной спеклограммы, приведенной на рис. 3. Нормировка дифракционного гало (рис. 7б) позволяет выровнять распределение интенсивности и существенно повысить точность определения периода полос.

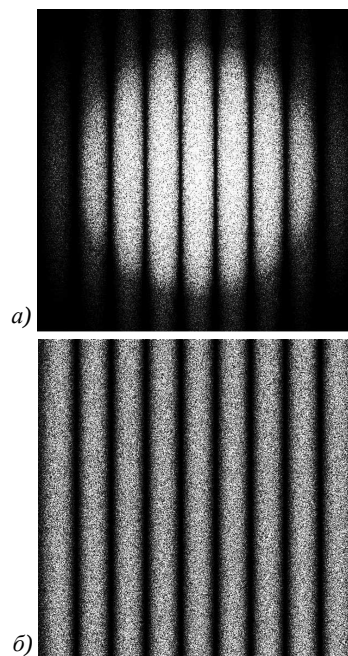


Рис. 7. Дифракционные гало, полученные из нелинейно обработанных (с использованием функции x^2) фурье-спеклограмм: а) без нормировки; б) с нормировкой с помощью эмпирической функции для дифракционного гало

Эффект расширения дифракционного гало может быть использован:

- 1) для повышения точности определения периода полос: чем большее число полос используется для определения периода, тем точнее это значение определяется;
- 2) для снижения порога чувствительности метода цифровой спекл-фотографии: чем меньше угол наклона, тем меньше смещение спеклов в спеклограммах и тем шире полосы в дифракционном гало, которые должны укладываться в его пределах.

3. Натурный эксперимент

В эксперименте использовалась двухэкспозиционная запись цифровых фурье-спеклограмм и фурье-голограмм по схеме, представленной на рис. 8. Для сравнения измерительных возможностей методов цифровой спекл-фотографии и цифровой голографической интерферометрии с записью в фурье-плоскости в схеме предусмотрена возможность формирования опорного пучка с помощью вогнутого сферического зеркала так, чтобы точечный опорный источник S_R находился примерно в одной плоскости с поверхностью объекта.

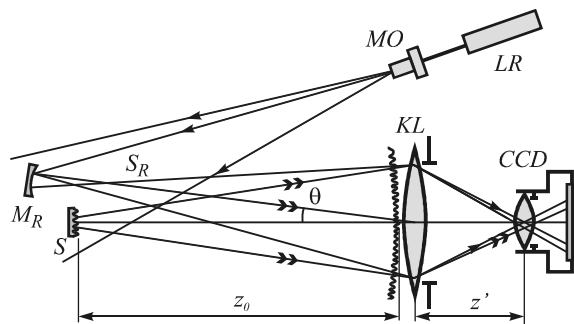


Рис. 8. Оптическая схема записи двухэкспозиционных фурье-спеклограмм и фурье-голограмм с использованием цифровой фотокамеры с несъемным штатным объективом: LR – лазер ($f \approx 0,63$ мкм); MO – микрообъектив ($20\times$, NA-0,4); S – объект; M_R – опорное сферическое зеркало ($f \approx 20$ мм), S_R – опорный источник, KL – коллективная линза ($f \approx 75$ мм); CCD – цифровая фотокамера Nikon D40x со штатным объективом

Использовались лазер непрерывного линейно поляризованного излучения ГН-5 (мощность 5 мВт, длина волны 0,63 мкм) и цифровая фотокамера Nikon D40x (размер ПЗС-матрицы $23,6 \times 15,8$ мм, в пикселах – 3872×2592) со штатным объективом Nikon AF-S DX NIKKOR ED 18-55mm 1:3,5-5,6 ГП.

В плоскости ПЗС-матрицы фотокамеры формировалось изображение апертуры коллективной линзы KL, заполненной дифракционным объектным спекл-модулированным полем (и опорным пучком в варианте записи фурье-голограммы). В качестве коллективной линзы использовался объектив ЛОМО ОКС4-75-1 (фокусное расстояние 75 мм, относительное отверстие 1:2,8). Запись спеклограмм и голограмм производилась в ручном режиме при отключенном режиме автофокусировки.

Поперечные размеры объекта D , расстояние z_0 между объектом и линзой KL, угол падения опорного пучка θ должны быть таковыми, чтобы ПЗС-матрица разрешала спеклы объектного поля в методе спекл-фотографии и несущие интерференционные полосы голограммной структуры в методе голографической интерферометрии.

Поперечные размеры спеклов в апертуре коллективной линзы KL можно оценить по формуле [22, 25]

$$\varepsilon_{\perp} \approx \lambda z_0 / D, \quad (8)$$

а период d несущих полос по формуле

$$d \approx \lambda / \sin \theta. \quad (9)$$

Поскольку объектив ПЗС-камеры должен разрешать спеклы и полосы в апертуре линзы KL, то в плоскости ПЗС-матрицы размеры спеклов $\varepsilon'_{\perp}$ и период полос d' не зависят от апертуры линзы и определяются просто с учетом коэффициента поперечного увеличения (уменьшения) объектива фотокамеры M :

$$\varepsilon'_{\perp} = M \varepsilon_{\perp}, \quad d' = M d. \quad (10)$$

В наших экспериментах обеспечивались условия уверенного разрешения спеклов, размеры которых на ПЗС-матрице составляли 5-50 пикселей для объектов с разными поперечными размерами. На рис. 9 в качестве примера показан малый фрагмент цифровой спеклограммы и соответствующее распределение интенсивности спекл-структуры в шкале отсчетов. Этот фрагмент взят из одного кадра двухэкспозиционной спеклограммы, пространственный спектр которой с интерференционными полосами представлен на рис. 10а.

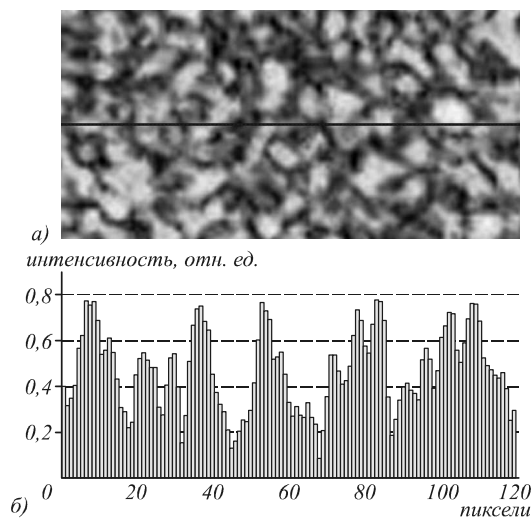


Рис.9. Фрагмент цифровой спеклограммы (а) и распределение нормированной интенсивности спекл-картины в шкале отсчетов ПЗС-матрицы (б)

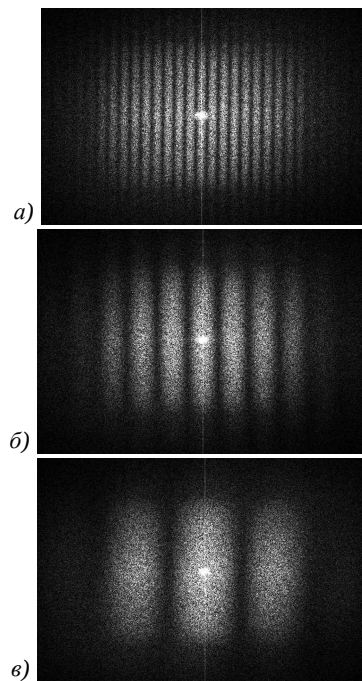


Рис. 10. Дифракционные гало – пространственные спектры двухэкспозиционных фурье-спеклограмм наклона объекта на малый угол α : $\alpha \approx 2,9 \cdot 10^{-4}$ рад $\approx 60''$ (а); $\alpha \approx 1,13 \cdot 10^{-4}$ рад $\approx 23''$ (б); $\alpha \approx 4,9 \cdot 10^{-5}$ рад $\approx 10''$ (в); получено для $M \approx 0,8$; $\gamma \approx 30^\circ$; $z_0 \approx 1$ м

Для записи спеклограмм и голограмм в дальнем поле дифракции расстояние z_0 должно быть достаточно большим по сравнению с размерами объекта. Для определения этого расстояния мы не придерживались излишне строгого для эксперимента критерия дальнего поля [23, 24, 28],

$$z_0 > D^2/4\lambda. \quad (11).$$

Экспериментальная запись и реконструкция с помощью фурье-преобразования цифровых фурье-спеклограмм и фурье-голограмм реализовывалась в наших экспериментах на существенно меньших расстояниях z_0 от поверхности объекта заданного размера D . Например, для $D=10$ мм согласно (11) должно быть $z_0 > 40$ м. В наших экспериментах вполне удовлетворительные результаты получались для $z_0 \approx 1-4$ м.

3.1. Спекл-фотография

В методе спекл-фотографии опорный пучок не использовался – записывались цифровые спеклограммы объекта в исходном и смещенном состояниях. Численная обработка полученных кадров изображений заключалась в фурье-преобразовании алгебраической суммы кадров и в формировании графического файла, отображающего пространственный спектр (дифракционное гало) суммарной спеклограммы. Преобразования полных кадров спеклограмм выполнялись только при однородном смещении спекл-структуры объектного поля, а именно: при наклоне объекта на малый угол α вокруг оси, лежащей в его плоскости. В этом случае спекл-структура объектного поля испытывает однородное поперечное смещение

$$\Delta x_s \approx \alpha (1 + \cos \gamma) z_0. \quad (12)$$

На рис. 10 приведены изображения пространственных спектров экспериментальных двухэкспозиционных цифровых фурье-спеклограмм наклона объекта (поворота вокруг вертикальной оси) на малый угол α . Период полос модуляции дифракционного гало обратно пропорционален углу наклона α .

В соответствии со свойствами численного фурье-преобразования период полос Λ_p , определяемый в количестве элементов цифрового изображения, связан с величиной взаимного смещения спеклов на спеклограммах Δn_p , также определенной в количестве элементов изображения, соотношением

$$N/\Lambda_p = \Delta n_p, \quad (13)$$

где N – размер изображения дифракционного гало в направлении, перпендикулярном полосам. В линейном выражении величина смещения спеклов $\Delta x'_s$ в плоскости ПЗС-матрицы определяется произведением

$$\Delta x'_s = \Delta n_p \Delta l_p, \quad (14)$$

где Δl_p – межпиксельное расстояние на ПЗС-матрице. Величина $\Delta x'_s$ связана с величиной смещения спеклов Δx_s в плоскости коллективной линзы КЛ, используемой при цифровой записи спеклограмм (рис. 8), соотношением

$$\Delta x'_s = \Delta x_s M, \quad (15)$$

где M – коэффициент поперечного увеличения оптической системы (объектива) ПЗС-камеры. На практике этот коэффициент удобнее определять экспериментально с использованием точной штриховой меры, помещаемой в плоскость апертуры коллективной линзы КЛ. В наших экспериментах $M \approx 0,8$.

Таким образом, из (12)–(15) для определения угла наклона α получаем соотношение

$$\alpha = \frac{N \Delta l_p}{M \Lambda_p (1 + \cos \gamma) z_0}. \quad (16)$$

Нелинейная обработка экспериментальных спеклограмм и нормировка дифракционного гало с интерференционными полосами позволяет повысить точность определения периода полос и, как следствие, точность определения параметров смещения поверхности объекта. На рис. 11 приведены изображения дифракционных гало двухэкспозиционных спеклограмм, записанных в линейном режиме и подвергнутых нелинейной обработке с использованием функции x^8 , с применением и без применения процедуры нормировки пространственного спектра суммарных спеклограмм.

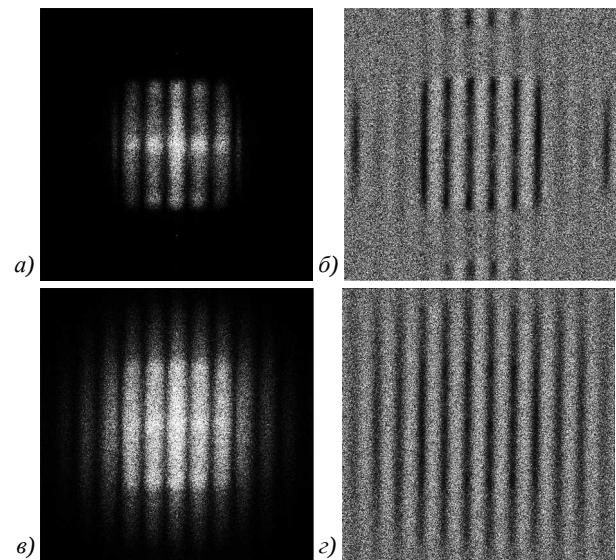


Рис. 11. Экспериментальные интерферограммы, полученные в линейном режиме записи спеклограмм (а,б) и при нелинейной обработке спеклограмм (в,г), без использования нормировки дифракционного гало (а,в) и с использованием нормировки (б,г)

Апертура поверхности объекта имела форму квадратного кольца с внешней и внутренней длинами сторон 10 и 6 мм, соответственно. Дифракционное гало спеклограмм объекта с такой апертурной

функцией $P(\vec{r})$ согласно (7) имеет сравнительно резко очерченную форму [26, 27, 20]. Этот эффект становится очень заметным при нормировке дифракционного гало с интерференционными полосами (рис. 11б). Нелинейная обработка спеклограмм, соответствующих исходному и смещенному положениям объекта, существенно расширяет дифракционное гало с интерференционными полосами и, как следствие, повышает точность измерений методом цифровой спекл-фотографии.

3.2. Голографическая интерферометрия

В экспериментальной реализации метода голографической интерферометрии записывались цифровые фурье-спеклограммы с использованием опорного пучка по схеме, представленной на рис. 8. Угол падения θ опорного пучка на апертуру линзы KL устанавливался из соображения удовлетворения двум противоположным требованиям. Угол θ должен быть достаточно малым, чтобы интерференционные полосы голограммной структуры разрешались и записывались ПЗС-матрицей цифровой камеры. С другой стороны, этот угол должен быть достаточно большим, чтобы дифракционное гало не накладывалось на восстановленные голографические изображения. При использовании линейной цифровой записи угловой размер гало – максимальный угол дифракции $\beta_{\max}$, равен угловому размеру объекта D/z_0 [20,23,29,30]. Следовательно, угол θ (рис.8) должен быть больше D/z_0 , $D/z_0 < \theta$. Для предельного разрешения интерференционных полос голограммной структуры достаточно, чтобы на периоде полос голограммной структуры d укладывалось не менее 3 пикселей ПЗС-матрицы. Это условие следует из теоремы Котельникова (соотношения Найквиста) [31]

$$f_d \geq 2 f_{\max}, \quad (17)$$

где f_d – частота дискретизации, $f_{\max}$ – максимальная частота сигнала, которым в данном рассмотрении служит голограммная структура с интерференционными полосами, определяющими максимальную частоту этого сигнала.

Тогда для угла падения опорного пучка получаем неравенства

$$D/z_0 < \theta < \lambda_0/3\Delta l_p, \quad (18)$$

где Δl_p – как и выше, период расположения пикселей ПЗС-матрицы.

В наших экспериментах период интерференционных полос голограммной структуры составлял примерно от 3 до 20 пикселей в зависимости от угла падения опорного пучка θ . На рис. 12 показан малый фрагмент цифровой голограммы и соответствующее распределение нормированной интенсивности голограммной структуры в шкале отсчетов практически с предельным соотношением между периодом интерференционных полос на голограмме и периодом расположения пикселей. Этот фрагмент

взят из одного кадра двухэкспозиционной фурье-голограммы, восстановленное изображение с которой с интерференционными полосами представлено на рис. 13а.

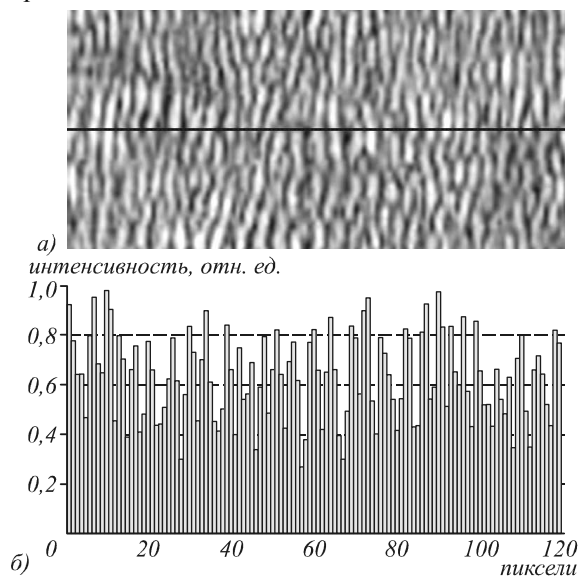


Рис. 12. Фрагмент цифровой голограммы (а) и распределение нормированной интенсивности голограммной структуры в шкале отсчетов ПЗС-матрицы (б)

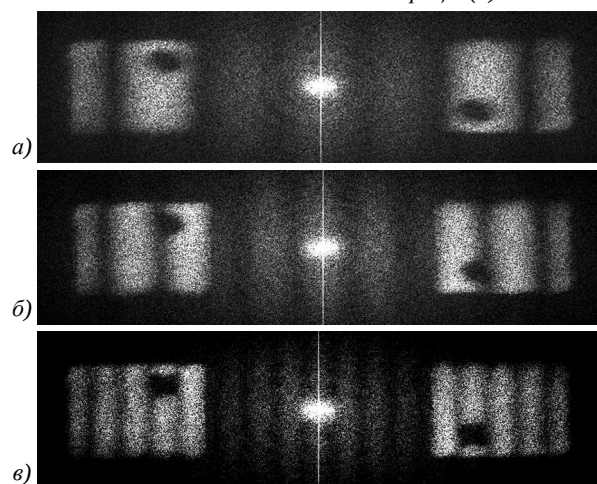


Рис. 13. Голографические интерферограммы наклона объекта, полученные при записи цифровых фурье-голограмм и численной процедуре обработки двухэкспозиционных цифровых голограмм: а) угол наклона $\alpha \approx 13^\circ$; б) $\alpha \approx 17^\circ$ в) $\alpha \approx 35^\circ$

На рис. 13 представлены голографические изображения с интерференционными полосами рассеивающего объекта прямоугольной формы, полученные (восстановленные) в результате численной обработки цифровых фурье-голограмм, соответствующих двум пространственным положениям объекта, отличающихся взаимным наклоном на угол α вокруг вертикальной оси. Записывались фурье-голограммы объекта в исходном состоянии (1-я экспозиция) и в смещенном положении после наклона на малый угол α (2-я экспозиция). Сумма числовых матриц, соответствующих этим цифровым изображениям, подвергалась двумер-

ному фурье-преобразованию. Квадрат модуля такого преобразования представлялся в формате графического файла-изображения.

Голографическая интерферометрия наклона объекта имеет более высокий порог чувствительности по сравнению с методом спекл-фотографии. Действительно, интерференционные полосы в спекл-фотографии формируются в дифракционном гало спеклограммы, протяженность которого вдвое больше протяженности голографического изображения [20]. Следовательно, в пределах дифракционного гало можно наблюдать полосы с большим периодом, вызванные меньшим углом наклона объекта, чем в пределах голографического изображения (см. также [29, 30]).

Нелинейная обработка спеклограмм, как показано выше, позволяет еще в большей степени снизить порог чувствительности метода спекл-фотографии по сравнению с методом голографической интерферометрии.

Запись двухэкспозиционных фурье-голограмм в отличие от записи спеклограмм позволяет определять параметры нормальных к поверхности объекта деформационных смещений. Например, изгибных деформаций поверхности. Такие смещения приводят к достаточно сложным изменениям спекл-структуры дифракционного поля, так что между спекл-структурами, соответствующими различным состояниям объекта, возникают декорреляционные изменения и невозможно наблюдать полосы модуляции в их суммарном пространственном спектре – дифракционном гало, даже при выделении малых участков спеклограмм.

При записи фурье-голограмм эта проблема преодолевается благодаря использованию опорного пучка и на восстановленных изображениях возможно наблюдение интерференционных полос, отражающих и качественные, и количественные параметры нормальных деформаций объекта. На рис. 14 приведены восстановленные с цифровых фурье-голограмм изображения объекта с интерференционными полосами – цифровые голографические интерферограммы.

Между экспозициями объект – металлическая мембрана, жестко закрепленная по контуру, претерпевала деформацию изгиба под действием сосредоточенной силы, приложенной в центральной части мембраны.

Наблюдаемая система кольцевых интерференционных полос позволяет определить профиль прогиба мембраны $g_z(x)$ с точностью, по нашим оценкам, до «половины полосы», что соответствует $\Delta g_z \approx 0,2$ мкм для He-Ne лазера с $\lambda = 0,63$ мкм при угле падения на объект лазерного пучка $\gamma \approx 45^\circ$. В предположении о нормальном смещении точек поверхности мембраны g_z для центров светлых интерференционных полос можно использовать уравнение [11,13,15]

$$g_z(1 + \cos \gamma) = m\lambda, \quad (19)$$

где $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$

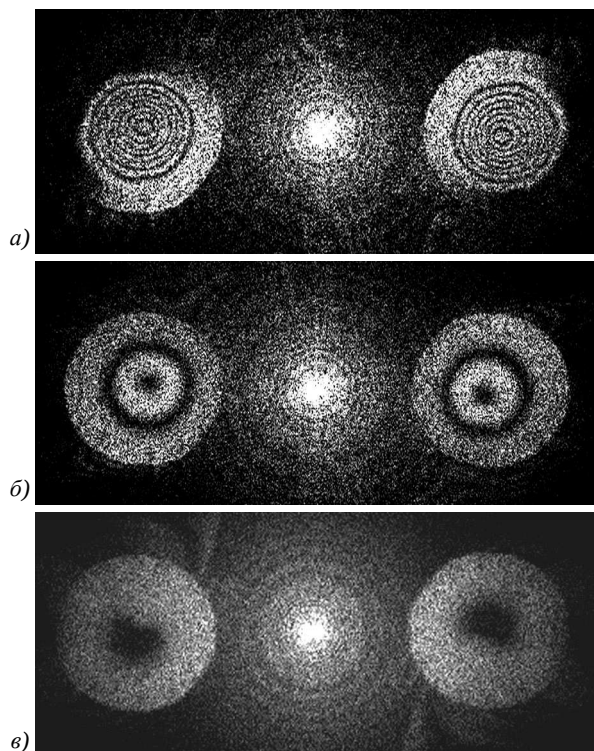


Рис. 14. Голографические интерферограммы деформации изгиба мембраны, жестко закрепленной по контуру, под действием сосредоточенной силы: а) смещение поверхности $g_z(x)$ в точке приложения нагрузки

(в центре кольцевых полос) $g_z \approx 2,5$ мкм;

б) $g_z \approx 0,5$ мкм; в) $g_z \approx 0,2$ мкм

На рис. 15 представлены профили прогиба мембраны, рассчитанные по интерферограммам, приведенным на рис. 14.

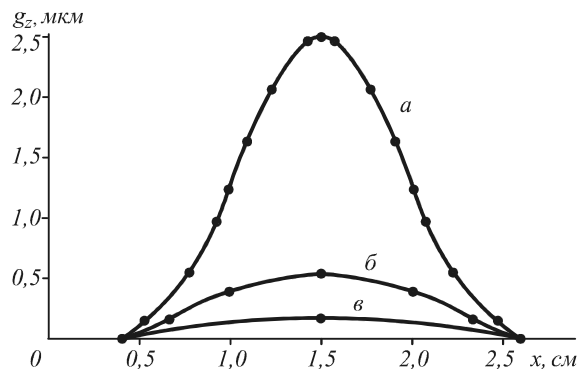


Рис. 15. Профили прогиба мембраны, рассчитанные по цифровым голографическим интерферограммам, полученным при различных нагрузках под действием сосредоточенной силы и представленным на рис. 12а,б,в

Использование когерентного опорного пучка при записи цифровой голограммы существенно усложняет экспериментальную систему по сравнению с методом спекл-фотографии. Однако разработанная в [17, 19] процедура синтеза голограммной структуры путем апостериорной компьютерной обработки цифровой фурье-спеклограммы позволяет, в принципе, отказаться от опорного пучка в реализации метода цифровой голографической интерферомет-

рии при записи дифракционного поля в фурье-плоскости. На рис. 16 приведены голографические изображения с интерференционными полосами, восстановленные с синтезированной двухэкспозиционной фурье-голограммы объекта, претерпевшего наклон на угол $\alpha \approx 21''$ между экспозициями. Приведенные интерферограммы показывают принципиальную возможность исключения опорного пучка в методе цифровой голографической интерферометрии.

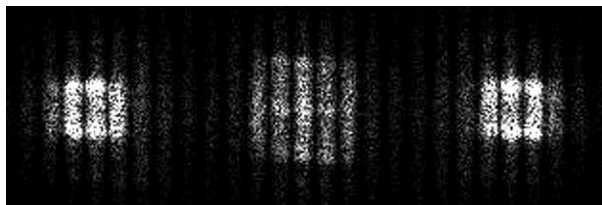


Рис. 16. Интерферограммы наклона объекта, восстановленные по синтезированной голограммным структурам в результате компьютерной обработки цифровых фурье-спеклограмм

Заключение

Использование цифровой записи пространственных лазерных спекл-модулированных дифракционных картин и голограммных структур расширяет функциональные и метрологические возможности методов двухэкспозиционной спекл-фотографии и голографической интерферометрии по сравнению с аналоговым вариантом реализации этих методов. Численная обработка цифровых спеклограмм и их дифракционных спектров позволяют заметно повысить точность измерений, снизив порог чувствительности спекл-фотографии.

Исключительно важной, с метрологической точки зрения, является возможность численной процедуры сглаживания спекл-эффекта в результирующем интерференционном сигнале – дифракционном гало. Программная обработка таких сглаженных интерференционных картин позволяет определить период интерференционных полос в пределе с точностью до одного пикселя изображения, что существенно увеличивает точность измерения параметров смещения контролируемого объекта.

Голографическая интерферометрия позволяет определять неоднородные смещения, которые нормальны к поверхности объекта, вызванные, например, изгибающей деформацией объекта. Это основное преимущество голографической интерферометрии по сравнению с методом спекл-фотографии. Однако использование опорного пучка в голографической интерферометрии существенно усложняет экспериментальную систему, повышает требования к помехозащищенности системы и к разрешающей способности цифровой камеры. Возможность преодоления этих проблем связана с разработанной в [17,19] процедурой синтеза голограммной структуры путем апостериорной компьютерной обработки цифровых спеклограмм, заключающейся в создании системы несущих полос в спеклах дифракционного поля.

В настоящей работе исследованы возможности цифровых методов с записью в дальней области дифракции объектного поля. Неточность выполнения экспериментальных условий формирования дальнего поля, как установлено, не влияет существенным образом на возможность формирования интерференционных картин, несущих информацию о параметрах смещения объекта. В голографической интерферометрии эта неточность снижает качество (разрешение) восстановленного изображения, что в большинстве практических задач не является фактором, определяющим эффективность метода измерения. Поэтому использование цифровой записи спеклограмм в общем случае в ближней области дифракции, включая область расфокусированного изображения объекта при использовании перетображающей оптической системы, позволяет существенно расширить функциональные возможности метода цифровой спекл-фотографии по отношению к разным типам контролируемых смещений поверхности рассеивающего объекта. В этом отношении, как показывают предварительные результаты наших исследований, возможен контроль изгибных деформаций поверхности методом цифровой спекл-фотографии с записью спекл-структур в расфокусированной зоне.

Благодарности

Авторы благодарят Д.В. Лякина, В.В. Лычагова и Ю.А. Герасимову за помощь в экспериментальных исследованиях. Работа выполнена при поддержке аналитической ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы» (2009–2010 годы), проекты № 2.1.1/4973 и № 2.1.1/2950.

Литература

1. **Schanrs, U.** Direct recording of holograms by a CCD target and numerical reconstruction / U. Schanrs, W. Juptner // *Appl. Opt.* – 1994. – V. 33. – P. 179-181.
2. **Fomin, N.A.** Speckle Photography for Fluid Mechanics Measurements – Springer-Verlag, Berlin, 1998. – 345 p.
3. **Rastogi, P.K.** Digital Speckle Pattern Interferometry and Related Techniques – Wiley, 2001. – 245 p.
4. **Журавлев, О.А.** Разработка автоматизированного метода исследования вибрационных характеристик энергоустановок / О.А. Журавлев, С.Ю. Комаров, К.Н. Попов, А.Б. Прокофьев // *Компьютерная оптика.* – 2001. – № 21. – С. 143-149. – ISSN 0134-2452.
5. **Schnars, U.** Digital holography / U. Schnars, W. Jueptner – Springer Verlag, 2004. – 164 p.
6. **Балтийский, С.А.** Современные методы цифровой голографии / С.А. Балтийский, И.П. Гуров, С. Де Никола, Д. Коппола, П. Ферраро // *Проблемы когерентной и нелинейной оптики*; под ред. И.П. Гурова и С.А. Козлова – СПб: СПбГУ ИТМО, 2004. – С. 91-117.
7. **Mironova, T.V.** Digital photography in measurements of shifts of object surfaces with formation of the speckle structure in white light / T.V. Mironova, T.T. Sultanov, V.A. Zubov // *Journal of Russian Laser Research.* – 2004. – V. 25, N 6. – P. 493-508.
8. **Baltiysky, S.** Characterization of microelectromechanical systems by the digital holography method / S. Baltiysky, I. Gurov, S. De Nicola, P. Ferraro, A. Finizio, G. Coppola

- // The Imaging Science Journal. – 2006. – V. 54, N 2. – P. 103-110.
9. **Разумовский, И.А.** Интерференционно-оптические методы механики деформируемого твердого тела / И.А. Разумовский – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. – 240 с.
 10. Laser speckle and related phenomena. Topics in Applied Physics / Ed. J.C. Dainty. V. 9. – Berlin: Springer-Verlag, 1975. – 286 p.
 11. **Островский, Ю.И.** Голографическая интерферометрия / Ю.И. Островский, М.М. Бутусов, Г.В. Островская – М.: Наука, 1977. – 336 с.
 12. **Клименко, И.С.** Голография сфокусированных изображений и спекл-интерферометрия / И.С. Клименко – М.: Наука, 1985. – 224 с.
 13. **Джоунс, Р.** Голографическая и спекл-интерферометрия / Р. Джоунс, К. Уайкс; пер. с англ. – М.: Мир, 1986. – 328 с.
 14. **Вест, Ч.** Голографическая интерферометрия / Ч. Вест; пер. с англ. – М.: Мир, 1982. – 504 с.
 15. **Островский, Ю.И.** Голографические интерференционные методы измерения деформаций / Ю.И. Островский, В.П. Щепинов, В.В. Яковлев – М.: Наука, 1988. – 248 с.
 16. Holographic interferometry. Principles and methods. Springer Series in Optical Sciences / Ed. P.K. Rastogi – V. 68. – Berlin: Springer-Verlag, 1995. – 328 p.
 17. **Горбатенко, Б.Б.** Реконструкция изображения по пространственному распределению интенсивности дифракционного спекл-модулированного поля / Б.Б. Горбатенко, Л.А. Максимова, В.П. Рябухо, Ю.В. Норов // Компьютерная оптика. – 2007. – Т. 31, № 2. – С. 26-33. – ISSN 0134-2452.
 18. **Рябухо, В.П.** Цифровая голография с виртуальной опорной волной / В.П. Рябухо, Б.Б. Горбатенко, Л.А. Максимова // Известия Саратовского государственного университета. Новая серия. Серия Физика. – 2008. – В. 2. – С. 11-23.
 19. **Горбатенко, Б.Б.** Восстановление голограммной структуры по цифровой записи фурье-спеклограммы / Б.Б. Горбатенко, Л.А. Максимова, В.П. Рябухо // Оптика и спектроскопия. – 2009. – Т. 106, № 2. – С. 321-328. – ISSN 0030-4034.
 20. **Горбатенко, Б.Б.** Пространственный спектр (дифракционное гало) фурье-спеклограммы рассеивающего объекта / Б.Б. Горбатенко, А.А. Гребенюк, Л.А. Максимова, В.П. Рябухо // Компьютерная оптика. – 2009. – Т. 33, № 1. – С. 43-51. – ISSN 0134-2452.
 21. **Гудмен, Дж.** Статистическая оптика / Дж. Гудмен; пер. с англ. – М.: Мир, 1988. – 528 с. (J.W. Goodman. Statistical optics / John Wiley & Sons. New York, 1985)
 22. **Goodman, J.W.** Speckle Phenomena in Optics: Theory and Applications / J.W. Goodman – Roberts & Company, Publishers, Englewood, CO, 2006. – 387 p.
 23. **Кольер, Р.** Оптическая голография / Р. Кольер, К. Беркхарт, Л. Лиин – М.: Мир, 1973. – 688 с.
 24. **Гудмен, Дж.** Введение в фурье-оптику / Дж. Гудмен; пер. с англ. – М.: Мир, 1970. – 364 с.
 25. **Франсон, М.** Оптика спеклов / М. Франсон; пер. с англ. – М.: Мир, 1980. – 171 с.
 26. **Клименко, И.С.** Об особенностях получения и интерпретации спекл-интерферограмм смещаемых объектов / И.С. Клименко, В.П. Рябухо // ЖТФ. – 1982. – Т. 52, В. 5. – С. 896-900.
 27. **Осипов, М.Н.** Применение кольцевой апертурной диафрагмы в спекл-интерферометрии / М.Н. Осипов,

- М.Ю. Шапошников // Компьютерная оптика. – 2002. – В. 24. – С. 110-113. – ISSN 0134-2452
28. **Борн, М.** Основы оптики / М. Борн, Э. Вольф; пер. с англ.; под ред. Г.П. Мотулевич. – 2-е изд. – М.: Наука, 1973. – 720 с.
29. **Клименко, И.С.** К сравнению чувствительности и точности методов голографической и спекл-интерферометрии при регистрации в фурье-плоскости / И.С. Клименко, В.П. Рябухо, Б.В. Федулеев // Оптика и спектроскопия. – 1986. – Т. 61, В. 5. – С. 1118-1123. – ISSN 0030-4034.
30. **Klimenko, I.S.** Comparison of the sensitivity and accuracy of holography and speckle interferometry with Fourier-plane recording / I.S. Klimenko, V.P. Ryabukho, B.V. Feduleev // Selected Papers on "Speckle metrology", SPIE Milestone Series, 1991. – Vol. MS35. – P. 425-429.
31. **Оппенгейм, А.В.** Цифровая обработка сигналов / А.В. Оппенгейм, Р.В. Шафер; пер. с англ.; под ред. С.Я. Шаца. – М.: Связь, 1979. – 416 с.

References

1. **Schans, U.** Direct recording of holograms by a CCD target and numerical reconstruction / U. Schans, W. Juptner // Appl. Opt. – 1994. – V. 33. – P. 179-181.
2. **Fomin, N.A.** Speckle Photography for Fluid Mechanics Measurements – Berlin: Springer-Verlag, 1998. – 345 p.
3. **Rastogi, P.K.** Digital Speckle Pattern Interferometry and Related Techniques – Wiley, 2001. – 245 p.
4. **Zhuravlev, O.A.** Development of the automated method of research of vibrating characteristics of power installations / O.A. Zhuravlev, S.Yu. Komarov, K.N. Popov, A.B. Prokof'ev. // Computer Optics. – 2001. – No 21. – P. 143-149. – ISSN 0134-2452. – (in Russian).
5. **Schnars, U.** Digital holography / U. Schnars, W. Jueptner – Berlin: Springer-Verlag, 2004. – 164 p.
6. **Baltiysky, S.A.** Modern methods of digital holography / S. Baltiysky, I. Gurov, S. De Nicola, G. Coppola, P. Ferraro / Problems of coherent and nonlinear optics. Ed. I.P. Gurov and S.A. Kozlov. – SPb: SPb GU ITMO, 2004. – P. 91-117. – (in Russian).
7. **Mironova, T.V.** Digital photography in measurements of shifts of object surfaces with formation of the speckle structure in white light / T.V. Mironova, T.T. Sultanov, V.A. Zubov // Journal of Russian Laser Research. – 2004. – V. 25, N 6. – P. 493-508.
8. **Baltiysky, S.** Characterization of microelectromechanical systems by the digital holography method / S. Baltiysky, I. Gurov, S. De Nicola, P. Ferraro, A. Finizio, G. Coppola // The Imaging Science Journal. – 2006. – V. 54, N 2. – P. 103-110.
9. **Razumovskiy, I.A.** Interference-optical methods of mechanics of deformable solid body / I.A. Razumovskiy - M.: MGTU named after N.E. Bauman, 2007. - 240 p. - (in Russian).
10. Laser speckle and related phenomena. Topics in Applied Physics / Ed. J.C. Dainty. V. 9. – Berlin: Springer-Verlag, 1975. – 286 p.
11. **Ostrovskiy, Yu.I.** Interferometry by Holography / Yu.I. Ostrovskiy, M.M. Butusov, G.V. Ostrovskaya. - Berlin and New York: Springer-Verlag, 1980. – 330 p.
12. **Klimenko, I.S.** Holography of focused images and speckle interferometry – M.: Science, 1985. – 224 p. – (in Russian).
13. **Jones, R.** Holographic and speckle interferometry / R. Jones, C. Wykes. – Cambridge University Press, 1983. – 330 p.
14. **Vest, C.** Holographic interferometry – Wiley, 1979. – 504 p.
15. **Ostrovskiy, Yu.I.** Holographic interferometry in experimental mechanics / Yu.I. Ostrovskiy, V.P. Shchepinov, V.V. Yakovlev. – Springer Series in Optical Sciences,

- Vol. 60. Edited by Theodor Tamir. – Berlin: Springer-Verlag, 1991. – 248 p. – ISBN 3-540-52604-8.
16. Holographic interferometry. Principles and methods. Springer Series in Optical Sciences / Ed. P.K. Rastogi – V. 68. – Berlin: Springer-Verlag, 1995. – 328 p.
 17. **Gorbatenko, B.B.** Reconstruction of image from spatial distribution of intensity of diffraction speckle-modulated field / B.B. Gorbatenko, L.A. Maksimova, V.P. Ryabukho, Yu.V. Norov // *Computer Optics*. – 2007. – V. 31, No 2. – P. 26-33. – ISSN 0134-2452. – (in Russian).
 18. **Ryabukho, V.P.** Digital optical holography with virtual reference wave / V.P. Ryabukho, B.B. Gorbatenko, L.A. Maksimova // *Vestnik Saratovskogo Universiteta*. – 2008. – № 2. – P. 11-23. – (in Russian).
 19. **Gorbatenko, B.B.** Reconstructing of spatial phase distributions and object images from speckle intensity patterns of the diffraction field / B.B. Gorbatenko, V.P. Ryabukho, L.A. Maksimova, // *Optics and Spectroscopy*. – 2006. – Vol. 101, No 5. – P. 811-815.
 20. **Gorbatenko, B.B.** Spatial spectrum (diffraction halo) of fourier-specklegram of scattering object / B.B. Gorbatenko, A.A. Grebenyuk, L.A. Maksimova, V.P. Ryabukho // *Computer Optics*. – 2009. – V. 33, No 1. – P. 43-51. – ISSN 0134-2452. – (in Russian).
 21. **Goodman, J.W.** Statistical optics – Wiley, 2000. – 567 p.
 22. **Goodman, J.W.** Speckle Phenomena in Optics: Theory and Applications – Roberts & Company, Publishers, Englewood, CO, 2006. – 387 p.
 23. **Collier, R.** Optical Holography / R. Collier, C. Burckhardt, L. Lin – New York; London: Academic Press, 1971. – 688 p.
 24. **Goodman, J.W.** Introduction to Fourier Optics – 2ed., – McGraw-Hill, 1996. – 457 p.
 25. **Franon, M.** La granularité laser (speckle) et ses applications en optique – Paris-New York-Barcelone-Milan: Masson, 1978. – 171 p.
 26. **Klimenko, I.S.** About features of formation and interpretation of speckle-interferogram of shifting object / I.S. Klimenko, V.P. Ryabukho // *Journal of Technical Physics*. – 1982. – V. 52, Issue 5. – P. 896-900. – (in Russian).
 27. **Osipov, M.N.** Application of ring aperture diaphragm in speckle-interferometry / M.N. Osipov, M.Yu. Shaposhnikov // *Computer Optics*. – 2002. – V. 24. – P. 110-113. – ISSN 0134-2452. – (in Russian).
 28. **Born, M.** Principles of Optics / M. Born, E. Wolf. – Cambridge, 2002. – 994 p.
 29. **Klimenko, I.S.** To comparison of sensitivity and accuracy of methods of holographic and speckle-interferometry at registration in fourier-plane / I.S. Klimenko, V.P. Ryabukho, B.V. Feduleev // *Optics and Spectroscopy*. – 1986. – V. 61, Issue 5. – P. 1118-1123. – ISSN 0030-4034. – (in Russian).
 30. **Klimenko, I.S.** Comparison of the sensitivity and accuracy of holography and speckle interferometry with Fourier-plane recording / I.S. Klimenko, V.P. Ryabukho, B.V. Feduleev // *Selected Papers on "Speckle metrology"*. SPIE Milestone Series. 1991. – Vol. MS35. – P. 425-429.
 31. **Oppenheim, A.V.** Digital signal processing / A.V. Oppenheim, R.W. Schaffer – Prentice-Hall, Inc.: Englewood Cliffs, New Jersey, 1975. – 416 p.

SPECKLE-PHOTOGRAPHY AND HOLOGRAPHIC INTERFEROMETRY WITH DIGITAL RECORDING OF DIFFRACTION FIELD IN FOURIER PLANE

*Boris Borisovich Gorbatenko*¹ (associate professor, e-mail: gorbor@pochta.ru),
*Anton Aleksandrovich Grebenyuk*² (student, e-mail: GrebenyukAA@yandex.ru),
*Ludmila Aleksandrovna Maksimova*³ (senior scientist, e-mail: MaksimovaLA@yandex.ru),
Olga Aleksandrovna Perepelitsina^{2,3} (associate professor, e-mail: perepelitsina@optics.sgu.ru),
Vladimir Petrovich Ryabukho^{2,3} (professor, head of laboratory, e-mail: rvp@sgu.ru)

¹ Saratov State Technical University,

² Saratov State University,

³ Institute of Precision Mechanics and Control of the Russian Academy of Sciences

Abstract

Methods of double exposure speckle-photography with digital recording of speckle-pattern of diffraction field in far diffraction area and method of holographic interferometry with recording of digital fourier-hologram for measurement of scattering object micro displacement are considered. Computer simulation of specklegram recording, processes of diffraction halo formations and formation of object image with modulating interference fringes reflecting object displacement is executed. It is shown, that numerical normalization of intensity distribution in diffraction halo allows to increase the measurement accuracy. The comparative analysis of metrological potential of considered methods shows lower threshold of sensitivity for speckle-photography method in comparison with the method of holographic interferometry. It is established, that nonlinear processing of digital specklegram, expanding of diffraction halo, allows essentially lowering a sensitivity threshold of methods. Natural experiments with using digital methods of speckle-photography and holographic interferometry with recording of diffraction field in fourier-plane are executed.

Key words: speckle-pattern, digital speckle-photography, diffraction, diffraction halo, fourier-specklegram, spatial spectrum, digital fourier-holography, holographic interferometry.