

Цифровая спекл-фотография с кольцевой апертурной диафрагмой

М.Н. Осипов^а, Р.Н. Сергеев^б

^а Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П.Королева, 443086, Московское шоссе, 34, Самара, Россия

^бАО «РКЦ «ПРОГРЕСС», 443009, ул. Земеца, 18, Самара, Россия

Аннотация

В работе рассматриваются вопросы повышения качества и расширение диапазона измеряемых перемещений в методе спекл-фотографии за счет применения кольцевой апертуры в оптической системе при регистрации сфокусированных изображений. Представлены теоретические оценки расширения диапазона измеряемых перемещений. Представлены экспериментальные результаты анализа интерференционных картин восстановленных методом Юнга с двухэкспозиционных спекл-фотографий, подтверждающих теоретические расчеты. Показана возможность применения разработанного оптико-электронного блока для предлагаемой измерительной системы на основе спекл-интерферометрии с диффузным полем.

Ключевые слова: обработка оптических изображений; спекл-структура; цифровая спекл-фотография; спекл-интерферометрия; дифракционное гало; пространственный спектр; микросмещения

1. Введение

Высокий потенциал современных численных методов анализа напряженно-деформированного состояния (НДС) позволили вывести эксперимент на новый качественный уровень. Так, стало возможным ставить более корректно задачу экспериментального исследования, а также интерпретировать его результаты [1]. Тем не менее, экспериментальные методы остаются основным критерием истинности существующих математических моделей, несмотря на большие достижения в сфере развития вычислительной техники и математических методов численного моделирования, которые позволяют решать широкий класс задач механики [1,2].

Особое место занимают оптические методы, так как они обладают таким важным свойством как бесконтактность, что в свою очередь приводит к повышению точности и достоверности получаемых результатов. Высокими метрологическими характеристиками обладают когерентные методы, такие как голографическая интерферометрия, спекл-интерферометрия, спекл-фотография и аналогичные, а благодаря большому объему получаемых экспериментальных данных, данные методы не имеют какой-либо другой альтернативы [1].

В силу низкой требовательности к стабильности оптической системы (в сравнении с голографической интерферометрией) для использования в промышленных условиях широкое распространение получает спекл-интерферометрия [3,4].

Чувствительность спекл-интерферометрии к определению величины перемещения зависит от размеров спекл-структуры, которая определяется параметрами используемой оптической системы при записи субъективной спекл-структуры, т.е. числовой апертурой оптической системы. Увеличение числовой апертуры оптической системы приводит к уменьшению размеров регистрируемой спекл-структуры и, следовательно, к увеличению чувствительности спекл-интерферометрии. Однако, с другой стороны, увеличение числовой апертуры оптической системы приводит к требованию использования высококачественной оптики, так как при таких параметрах начинают существенным образом сказываться аберрации оптической системы, которые приводят к искажению регистрируемой информации. Теоретические и экспериментальные исследования принципов работы оптических приборов показали, что наличие в них кольцевых апертурных диафрагм позволяет повысить разрешающую способность зеркальных телескопов и объективов [5].

Следует отметить, диапазон контролируемых перемещений для спекл-интерферометрии находится в пределах 0,3–6,3 мкм, а для спекл-фотографии 0,001–1 мм [6]. Таким образом комплексная измерительная система на базе двух методов будет обладать достаточно высокими метрологическими характеристиками.

В работе представлены результаты исследования показывающие возможность разработки измерительной системы на основе спекл-эффекта с широким диапазоном измерений использующую кольцевую апертуру для повышения качества в оптической схеме при регистрации сфокусированных изображений. Представлены экспериментальные результаты анализа интерференционных картин восстановленных методом Юнга с двухэкспозиционных спекл-фотографий, подтверждающих теоретические расчеты. Показана возможность применения разработанного оптико-электронного блока для предлагаемой измерительной системы на основе спекл-интерферометрии с диффузным полем.

2. Применение кольцевых апертур

Рассмотрим образование интерференционных картин в двухэкспозиционной спекл-фотографии при использовании в оптической системе кольцевой апертурной диафрагмы. Оптическая схема регистрации спекл-фотографий отличается от стандартной тем, что в плоскости входного зрачка оптической системы располагается кольцевая диафрагма.

Для расчета выберем систему координат таким образом, чтобы координатные оси x_1 , y_1 совпадали с Выражение описывающие образование оптической системой спекл-картин в плоскости фотопластинки позволяют оценить размеры

спекл-структуры [2]. В плоскости входного зрачка оптической системы располагается кольцевая диафрагма, имеющая вид двух концентрических окружностей с радиусами α и $\epsilon\alpha$, где ϵ - некоторое положительное число, меньшее единицы.

Средний размер спекл-структуры в плоскости фотопластинки определяется следующим выражением [2,5]:

$$I(x, y) = I_0(x, y) \left(\left[\frac{2J_1(k\alpha w)}{k\alpha w} \right] - \epsilon^2 \left[\frac{2J_1(k\epsilon\alpha w)}{k\epsilon\alpha w} \right] \right)^2, \quad (1)$$

где $k = 2\pi/\lambda$; λ - длина волны лазерного излучения; $w = \sqrt{x^2 + y^2}$; x и y - координаты точки в плоскости фотопластинки относительно оптической оси, где определяется значение интенсивности.

Из анализа выражения (1) следует, что при использовании кольцевой апертуры дифракционное поле в плоскости фотопластинки описывается разностью функций Бесселя первого порядка J_1 в отличие от обычной круговой апертуры, при которой дифракционное поле в плоскости фотопластинки определяется только функцией Бесселя первого порядка J_1 . Размер дифракционного гало, как и следовало ожидать, зависит от размеров кольца. Для круговой апертуры ($\epsilon = 0$) значение первого минимума интенсивности, то есть функций Бесселя первого порядка J_1 определяется хорошо известным выражением $w = 0.61\lambda/\alpha$ [5]. При увеличении ϵ значение первого минимума уменьшается и в пределе, когда $\epsilon \rightarrow 1$, то разность функций Бесселя первого порядка стремится к функции Бесселя нулевого порядка J_0 . В этом случае распределение интенсивности в определяется следующим выражением:

$$I(x, y) = I_0(x, y) [2J_0(k\alpha w)]^2, \quad (2)$$

Так как первый нуль функции Бесселя J_0 определен при значении $k\alpha w = 2.40$, то с увеличением ϵ радиус первого темного кольца дифракционной картины приближается к величине, определяемой значением $w = 0.38\lambda/\alpha$. Таким образом, наличие кольцевой апертуры приводит к уменьшению размеров спеклов образующих спекл-картину, и, следовательно, к увеличению чувствительности метода спекл-интерферометрии.

В расчетах можно предположить, что смещение исследуемой поверхности между двумя экспозициями происходит только вдоль оси x . Такой выбор значительно упрощает расчет и не влияет на общность рассуждений, поскольку из теории спекл-интерферометрии известно, что интерференционные полосы Юнга, при расшивке спеклограмм методом Юнга, ортогональны к направлению вектора смещения [7].

На рисунке 1 представлены фотографии полос Юнга зафиксированные в Фурье плоскости в эксперименте с оптической схемой содержащей кольцевую диафрагму. На рис. 1а изображены полосы Юнга, полученные по обычной оптической схеме записи спекл-фотографий, в которой оптическая система имеет круговую апертуру диаметром 50 мм. На рис. 1б изображены полосы Юнга, полученные с кольцевой апертурой имеющей размеры внешнего диаметра 50 мм и внутреннего диаметра 20 мм. На рис. 1в изображены полосы Юнга, полученные с кольцевой апертурой имеющей размеры внешнего диаметра 50 мм и внутреннего диаметра 45 мм.

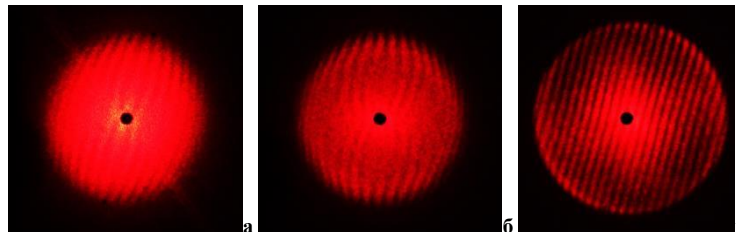


Рис. 1. Фотографии полос Юнга в Фурье-плоскости.

Как видно из фотографий, при отсутствии кольцевой апертуры (Рис. 1а) полосы Юнга имеют нелинейный вид и не различимы на дифракционном гало. Уменьшение ширины кольца (Рис. 1б, 1в) приводит к увеличению размера дифракционного гало и возникновению качественных полос Юнга, имеющих равномерную ширину по всему дифракционному полю, в отличие от стандартных полос Юнга, имеющих сигарообразную форму.

3. Цифровая спекл-фотография

С целью автоматизации процесса получения и расшивки спеклограмм вместо фотопластинки можно применять ПЗС-матрицу, при этом спеклограмма, также будет представлять распределение интенсивности спекл-поля. Для этого необходимо, чтобы регистрируемая спекл-структура уверенно разрешалась ПЗС-матрицей - размеры спеклов должны в несколько раз превышать размеры пикселей ПЗС-матрицы. При использовании линзовой схемы записи фурье-спеклограммы это достигается путем уменьшения размера объекта-источника спекл-модулированного поля, и использования линзы с достаточно большим фокусным расстоянием f [8,9].

В работе [10], предложен метод позволяющий определять смещение спекл-структуры в субпиксельном диапазоне, а также с субпиксельной точностью в интервале относительно больших взаимных микросмещений спекл-структур. Это позволяет существенно расширить диапазон измерений проводимых с помощью цифровой спекл-фотографии.

В работе [11] показана возможность разработанного метода для регистрации нестационарных течений. Показана надежность данного метода для мониторинга структуры нестационарного течения при взаимодействии с ударной волной

с пограничным слоем. В работе [12] предложены два метода, позволяющие проводить измерения рельефа поверхности конструкций.

На основании данного обзора литературы предлагается на базе разработанного мобильного оптико-электронного блока [13] цифрового спекл-интерферометра позволяющая с небольшой перестройкой создать комплексную универсальную установку. Большая востребованность в такой измерительной установке имеется в аэрокосмической отрасли.

4. Заключение

В работе приведен теоретический расчет распределения интенсивности в спекл-структурах на стадии записи и восстановления двухэкспозиционных спекл-фотографий с кольцевой и открытой апертурами. Приведен теоретический анализ выражений для различных размеров кольцевых апертур. На основании теоретических расчетов проведены экспериментальные исследования по записи и восстановлению спекл-интерферограмм с различными кольцевыми апертурами. Измерение параметров спекл-структуры проведенные на основании экспериментальных данных подтвердили теоретические расчеты. Исходя из этого, можно сделать следующие выводы:

1. Повышается чувствительность метода спекл-интерферометрии в 1,6 раза.
2. Расширяется диапазон измерения перемещений в сторону меньших значений и больших значений смещений.
3. Улучшается качество интерференционных полос Юнга.
4. Повышается точность измерения периода полос Юнга и следовательно, точность определения поля перемещений.

Кроме того, применение кольцевых диафрагм в спекл-интерферометрии позволяет упростить разработку алгоритма для автоматизации обработки полос и сократить время обработки.

Таким образом, применение кольцевых апертур в спекл-интерферометрии является перспективным. Исходя из проведенной работы, можно заключить, что кольцевые апертуры должны найти широкое применение в спекл-интерферометрии, а также в голографической интерферометрии сфокусированных изображений.

Литература

- [1] Разумовский, И.А. Экспериментальный анализ нелинейных динамических процессов с использованием оптико-интерференционных методов/И.А. Разумовский, И. Н. Одинцев//Вестник научно-технического развития.– 2012.– № 8(60).– С. 35-56.
- [2] Осипов, М.Н. Применение кольцевой апертурной диафрагмы в спекл-интерферометрии/М.Н. Осипов, М.Ю. Шапошников// Компьютерная оптика. – 2002. - № 24. – С. 110-113.
- [3] Жужукин, А.И. Мобильный спекл-интерферометр для исследования форм колебаний вибрирующих объектов во вневидимых условиях[Электронный ресурс]/А.И. Жужукин// Электронный журнал «Труды МАИ».– 2011.– № 48. – Режим доступа: [http://www.mai.ru\(06.02.2017\)](http://www.mai.ru(06.02.2017)).
- [4] Сергеев, Р.Н. Мобильный цифровой спекл-интерферометр с непрерывным лазером для регистрации деформационных полей перемещений и дефектоскопии конструкционных материалов/Р.Н. Сергеев, Ю.В. Харчикова//Известия СНЦ РАН. – 2012. Т. 14, № 4. - С.216-220.
- [5] Борн, М. Основы оптики/ М. Борн, Э. Вольф. – М.: Главная редакция физико-математической литературы изд-ва «Наука». - 1973. – 720 с.
- [6] Владимиров, А.П. Динамическая спекл-интерферометрия деформируемых тел/А.П. Владимиров. – Екатеринбург: УрО РАН. – 2004. – 243 с.
- [7] Джоунс, Р. Голографическая и спекл-интерферометрия/ Р. Джоунс, К. Уайкс. – М.: Мир. -1986. – 328 с.
- [8] 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.
- [9] Горбатенко, Б.Б. Спекл-фотография и голографическая интерферометрия с цифровой записью дифракционного поля в фурье-плоскости/ Б.Б. Горбатенко, А.А. Гребенюк, Л.А. Максимова, О.А. Перепелицына, В.П. Рябухо//Компьютерная оптика. – 2010. – Т. 34, № 1. – С. 69-81.
- [10] Максимова, Л.А. Цифровая спекл-фотография с корреляционной обработкой пространственного спектра спеклограммы для определения микросмещений рассеивающего объекта/ Л.А. Максимова, П.В. Рябухо, Н.Ю. Мысина, В.П. Рябухо// Изв.Сарат.ун-та. Нов.сер. Сер. Физика. – 2015. – Т. 15, вып.3. – С. 5-11. DOI:10.18500/1817-3020-2015-15-3-5-11.
- [11] Фомин, Н.А. Корреляционный анализ цифровых изображений течений с субпиксельной точностью/Н.А. Фомин, О.В. Мелеева//Автометрия. – 2012. - Т. 48, № 3. – С.82-89.
- [12] Майоров, Е.Е. Исследование влияния спекл-структуры на формирование интерференционного сигнала и погрешность измерений/ Е.Е. Майоров, В.Т. Прокопенко//Научное приборостроение. – 2013. – Т. 23, № 2. – С.38-46.
- [13] Shakhmatov, E.V. Development and application of mobile digital speckle interferometer for vibrometer model sample honeycomb/E.V. Shakhmatov, O.A. Zhuravlev, R.N. Sergeev, A.I. Safin//Procedia Engineering. – 2015.–V. 106.– P. 247-252. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.06.031.