

УДК 582.29

РАЗВИТИЕ ЦИФРОВОЙ СПЕКЛ-ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ¹

© 2013 М.Н. Осипов, В.А. Хохлов, А.Н. Чекменев²

В работе рассматривается развитие спекл-интерферометрии на основе анализа поведения интенсивности одиночного спекла для исследования динамических процессов в механике. Предложена оптическая схема для реализации предлагаемого способа измерений. Рассмотрены ограничения, накладываемые на предлагаемую оптическую схему. Дана оценка диапазона измерений величин динамических перемещений. Представлены экспериментальные результаты измерения параметров колебаний исследуемой поверхности.

Ключевые слова: динамические процессы в механике, экспериментальные методы механики, неразрушающие методы, когерентная оптика, спекл-интерферометрия, обработка и анализ изображений и сигналов.

Введение

Одной из основных проблем механики твердого тела как фундаментального, так и прикладного характера, во многом определяющей прочность и долговечность элементов конструкций, является исследование динамических процессов в механике, в особенности исследование частотных характеристик механических конструкций в реальном времени. Несмотря на большие достижения в разработке математических моделей механики твердого тела, математических методов численного моделирования и развития вычислительной техники, при оценке и прогнозировании поведения элементов конструкций при динамических нагрузках не могут учитываться все реальные условия эксплуатации конструкций, и, в силу этого, все теоретические расчеты требуют подтверждения экспериментальными результатами.

Экспериментальные методы, и в особенности методы когерентной оптики, являются в настоящий момент основой как при фундаментальных исследованиях различных задач механики, так и при практическом контроле и разработке новых элементов конструкций в различных областях промышленности, так как являются методами неразрушающих исследований и не влияющих на происходящие процессы.

¹Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 12-08-00390-а.

²Осипов Михаил Николаевич (osipov7@yandex.ru), Хохлов Вадим Александрович (vadim.a.khokhlov@gmail.com), Чекменев Антон Николаевич (a.chekmenev@samsu.ru), кафедра безопасности информационных систем Самарского государственного университета, 443011, Российская Федерация, г. Самара, ул. Акад. Павлова, 1.

Появление когерентного лазерного излучения стало значительным шагом для развития оптических методов измерений, среди которых необходимо выделить методы голографической и спекл-интерферометрии. Данные методы позволили проводить измерения перемещений с интерферометрической точностью на реальных объектах. Однако данные методы имеют существенный недостаток по сравнению с классической интерферометрией, который обусловлен наличием собственных шумов — спеклов, которые затрудняют обработку интерференционных полос, несущих информацию о динамике исследуемого объекта. Следует отметить, что на основе самих спекл-структур были предложены различные методы измерений полей поверхностных перемещений объектов с интерферометрической точностью — спекл-фотография, корреляционная спекл-интерферометрия и др [1; 2].

Одной из первых работ по устранению спекл-шумов в голографической и спекл-интерферометрии является работа Н.Г. Власова [3], в которой предлагается способ интерференционных измерений полей перемещений в диффузно-когерентном излучении, основанном на измерении интерференционных полос внутри спекла. Основным недостатком данного метода является то, что период интерференционных полос, наблюдаемых внутри спекла, очень мал, так как размеры самого спекла составляют порядка десятка микрон.

Проблемам обработки голографических и спекл-интерферограмм уделяется большое внимание с начала исследований в данном направлении и по настоящее время. Следует отметить работы, вышедшие в последнее время, в которых рассматриваются различные методы и алгоритмы, основанные на Фурье и вейвлет-преобразованиях, статистических методах, что позволяет повысить качество обработки интерферограмм [4–8].

В работах [9–11] рассмотрены возможности расширения диапазона измерений динамических процессов с использованием спекл-структур и стандартной классической интерферометрии на основе анализа поведения распределения интенсивности в спекл-структурах.

Для повышения чувствительности и расширения диапазона измеряемых перемещений с помощью двухэкспозиционной спекл-фотографии в работе [12] предложено при регистрации спекл-изображения объекта использовать объективы с кольцевой апертурой.

Однако методы, предлагаемые в данных работах, частично решают указанные проблемы голографической и спекл-интерферометрии. Проблема регистрации динамических процессов механики в реальном времени полностью на данный момент не решена.

Целью данной работы является развитие метода спекл-интерферометрии на основе анализа поведения интенсивности одиночного спекла для исследования динамических процессов механики в реальном времени.

1. Спекл-структура

Спеклы — это пятнистая структура в распределении интенсивности когерентного света в пространстве, связанная с интерференцией отраженного когерентного излучения от шероховатой поверхности.

Хорошо известно, что существует два вида спекл-структур: объективные, образованные в пространстве за счет интерференции большого количества отраженных лучей от исследуемой шероховатой поверхности, и субъективные, образован-

ные и зафиксированные на фотоматериале с помощью оптической системы в плоскости изображения исследуемой шероховатой поверхности.

Размеры поперечные (H) и продольные (L) объективных и субъективных спеклов определяются хорошо известными выражениями [1; 2]:

$$H = 1,22 \frac{\lambda}{\alpha}, \quad (1)$$

$$L = \frac{4\lambda}{\alpha^2}, \quad (2)$$

где λ — длина волны лазерного излучения; α — отношение диаметра освещенной области исследуемой шероховатой поверхности к расстоянию от исследуемой шероховатой поверхности до точки регистрации спекла (объективная спекл-структура); α — отношение диаметра входной апертуры к фокусному расстоянию оптической системы (субъективная спекл-структура).

Смещения поверхности исследуемого объекта, происходящие под воздействием различных сил, приводят к изменению параметров спекл-структур — поперечных и продольных размеров, а также интенсивности как в пространстве, так и во времени, что связано непосредственно с изменением фазы отраженных волн от исследуемой поверхности.

Анализ формул (1) и (2) показывает, что размеры спеклов не могут быть основой для измерений без применения дополнительных методов их обработки — спекл-фотография (метод Юнга), корреляционная спекл-интерферометрия и др. [1; 2]. Поведение интенсивности спекла связано с изменением оптического пути, то есть с изменением его фазы. Для измерения поведения интенсивности спекл-структуры, связанной с динамикой исследуемой поверхности, необходимо наложить на нее дополнительно опорную волну.

2. Предлагаемое решение

При регистрации спекл-изображения исследуемого объекта с помощью оптических систем хорошо известно, что одиночный спекл субъективной спекл-картины в плоскости изображения жестко связан с конкретно исследуемой точкой объекта. Следовательно, анализ поведения одиночного спекла в изображении позволит оценить изменения, происходящие с исследуемым объектом в конкретной точке. Как отмечалось выше, размеры спеклов непосредственно не могут быть использованы для проведения измерений.

Одним из параметров спеклов, который, как указывалось выше, также может быть использован для проведения измерений, является интенсивность.

Интенсивность спекла зависит от его фазы, зависящей от интерферирующих волн, которые образует данный спекл. Изменение значения фазы спекла на $\pm\pi(2n+1)$ (где $n = 0, 1, 2, \dots$) приводит к изменению интенсивности спекла от минимального до максимального значения или наоборот. Для регистрации изменения интенсивности необходимо использовать опорную волну, которая накладывается на субъективную спекл-структуру исследуемого объекта в плоскости изображения. При наложении на субъективную спекл-структуру опорной волны образуются вторичные интерференционные полосы, покрывающие спекл-структуру изображения (рис. 1). Ширина вторичных интерференционных полос d при малых углах схождения взаимодействующих лучей определяется хорошо известным выражением [13]:

$$d \simeq \frac{\lambda}{\Theta}, \quad (3)$$

где Θ — угол схождения между опорным лазерным излучением и сфокусированным рассеянным предметным лазерным излучением от исследуемого объекта, образующими спекл структуру с вторичной интерференционной картиной в плоскости фотодетектора.

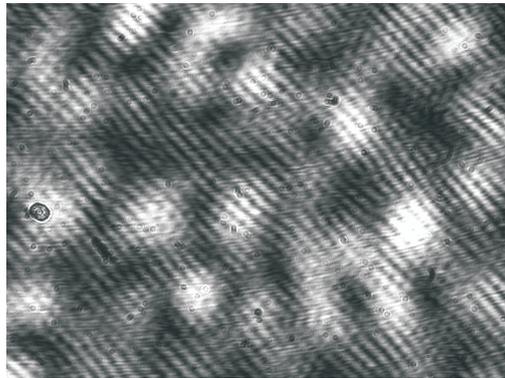


Рис. 1. Спекл-структура с наложенными вторичными интерференционными полосами

Так как основной целью предлагаемого решения является анализ поведения одиночного спекла как целого, то необходимо, чтобы его интенсивность менялась одновременно по всему полю одиночного спекла, в отличие от предлагаемого метода в работе [3]. Следовательно, для изменения интенсивности одиночного спекла по всему его полю необходимо, чтобы ширина вторичных интерференционных полос была больше его поперечных размеров, то есть

$$d > H. \quad (4)$$

Такие условия достигаются выбором оптической схемы при регистрации субъективных спекл-картин с наложенной опорной волной.

Для исследования быстропротекающих процессов, которые могут быть определены по поведению интенсивности одиночного спекла, необходимо использовать быстродействующие фотодетекторы. Тогда, исходя из поставленной задачи, необходимо, чтобы выполнялось дополнительное условие — размер чувствительного элемента быстродействующего фотодетектора должен быть меньше или равен размеру одиночного спекла, то есть

$$h \leq H, \quad (5)$$

где h — максимальное значение из размеров чувствительного элемента фотодетектора.

При выполнении данных условий выходное напряжение с фотодетектора будет соответствовать изменению интенсивности одиночного спекла, которая зависит от динамики исследуемой поверхности.

3. Теоретические основы

Для реализации предложенного способа рассмотрим оптическую схему, которая представлена на рис. 2. Лазерное излучение с помощью делителя BS_1 расщепляется на два луча, один из которых (предметный) с помощью оптической

системы L_1 освещает исследуемый объект. Отраженное излучение от объекта с помощью оптической системы L_2 формирует изображение исследуемой поверхности в плоскости ПЗС матрицы (CCD) и в плоскости фотодетектора PD . А второй луч (опорный) с помощью оптической системы L_3 и BS_2 накладывается на предметный пучок, образуя вторичную интерференционную картину в плоскости ПЗС матрицы (CCD) и в плоскости фотодетектора PD .

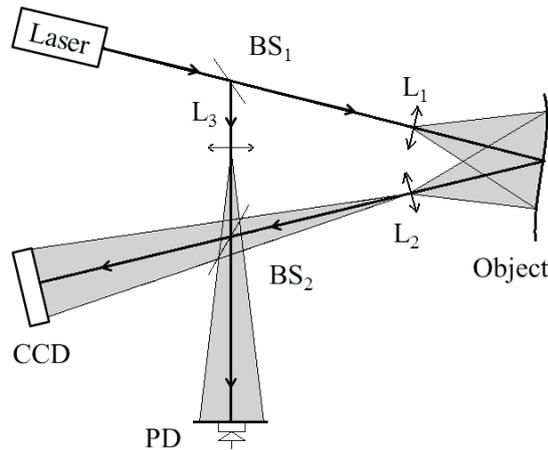


Рис. 2. Оптическая схема регистрации изменения интенсивности одиночного спекла

В данной оптической схеме ПЗС матрица будет регистрировать стандартные спекл-интерферограммы [14], а в плоскости фотодетектора PD быстродействующий точечный фотодетектор будет регистрировать изменение интенсивности одиночного спекла при выполнении условий (4) и (5).

Рассмотрим теоретически изменение интенсивности в одиночном спекле при выполнении условий (4) и (5). Используя комплексную форму записи вектора электрической напряженности электромагнитного поля, запишем векторы электрической напряженности на фотодетекторе для опорной и предметной волн, образующих интерференционную картину, в следующем виде:

$$\vec{E}_1 = \vec{E}_0 e^{i(\omega t - kx_1 + \varphi)}, \quad (6)$$

$$\vec{E}_2 = \vec{E}_0 e^{i(\omega t - kx_2 + \varphi)}, \quad (7)$$

где \vec{E}_0 — вектор амплитуды электрической напряженности электромагнитного поля; $k = 2\pi/\lambda$ — волновое число; ω — круговая частота лазерного излучения; φ — начальная фаза, которую будем считать одинаковой для обеих волн; x_1 — расстояние опорной волны от лазера до быстродействующего фотодетектора; x_2 — расстояние от лазера до объекта и от объекта до быстродействующего фотодетектора.

Расстояние от лазера до объекта и от объекта до быстродействующего фотодетектора запишем в следующем виде:

$$x_2 = r_0 + r \pm 2\Delta r(t), \quad (8)$$

где r_0 — расстояние от лазера до исследуемой поверхности; r — расстояние от объекта до быстродействующего фотодетектора, $\Delta r(t)$ — перемещение исследуемой поверхности.

Так как фотодетектор фиксирует интенсивность, то изменение интенсивности в интерференционной картине одиночного спекла запишется в следующем виде:

$$I(x, t) = |(\vec{E}_1 + \vec{E}_2)|^2 = 2\vec{E}_0^2 \{1 + \cos [k(x_1 - r_0 - r \pm 2\Delta r(t))]\}. \quad (9)$$

Как следует из выражения (9) и как отмечалось выше, интенсивность одиночного спекла меняется от минимального до максимального значения при изменении значения фазы спекла на $\pm\pi(2n + 1)$, (где $n = 0, 1, 2, \dots$), которая связана с динамикой поверхности, то есть с изменением Δr во времени.

Изменение интенсивности одиночного спекла на входе фотодетектора преобразуется в изменение выходного напряжения фотодетектора, которое, исходя из выражения (9), можно записать в следующем виде:

$$u(t) = A + B \cos [\varphi(0) - \varphi(t)], \quad (10)$$

где $u(t)$ — выходное напряжение на фотодетекторе; A — постоянная составляющая напряжения смещения на выходе электрической схемы, которая связана с усредненным значением изменения интенсивности одиночного спекла; B — амплитуда полезного выходного напряжения, которая определяется параметрами оптоэлектронной схемы, $\varphi(0) = k(x_1 - r_0 - r)$ — начальное значение разности фаз между опорным излучением и рассеянным лазерным излучением от исследуемой поверхности, образующими спекл-структуру, которое может меняться в зависимости от начальных условий и остается постоянным в процессе измерений; $\varphi(t) = \pm 2k\Delta r(t)$ — изменение фазы в одиночном спекле, связанное с изменением оптического пути при динамических смещениях исследуемой поверхности.

Из анализа формулы (10) очевидно, что изменение выходного напряжения фотодетектора зависит от изменения фазы $\varphi(t)$, характеризующей динамику спекла, связанную с перемещением исследуемой поверхности. Так как интенсивность спекла меняется от минимального до максимального или наоборот, то соответственно и выходное напряжение с фотодетектора меняется от минимального значения — $u(t)_{\min}$ до максимального значения — $u(t)_{\max}$ или наоборот.

Из анализа выражений (9) и (10) также следует, что изменение выходного напряжения от минимального до максимального (или наоборот) соответствует смещению исследуемой поверхности на величину, равную $\lambda/4$. Кроме того, при колебаниях исследуемой поверхности с амплитудой больше чем $\lambda/8$ должны образовываться осциллирующие пакеты. Количество осцилляций будет определять удвоенную амплитуду колебаний исследуемой поверхности, а удвоенный временной интервал между пакетами будет определять частоту колебаний исследуемой поверхности.

Результаты теоретических расчетов поведения выходного напряжения $u(t)$ на основе выражений (9) и (10) при установившихся гармонических колебаниях исследуемой поверхности представлены на рис. 3 (время t представлено в относительных единицах).

На рис. 4 представлены результаты экспериментального исследования колебаний исследуемой поверхности при частоте колебания 50 Гц и 100 Гц на основе предлагаемого метода анализа поведения интенсивности одиночного спекла.

Представленные экспериментальные осциллограммы (рис. 4) полностью подтверждают теоретические выводы по определению параметров установившихся колебаний исследуемой поверхности на основе анализа поведения интенсивности одиночного спекла.

Из экспериментальных результатов, на основе подсчета осцилляций в пакете, можно определить амплитуду колебаний, которая в данном случае равна $7\lambda/4$.

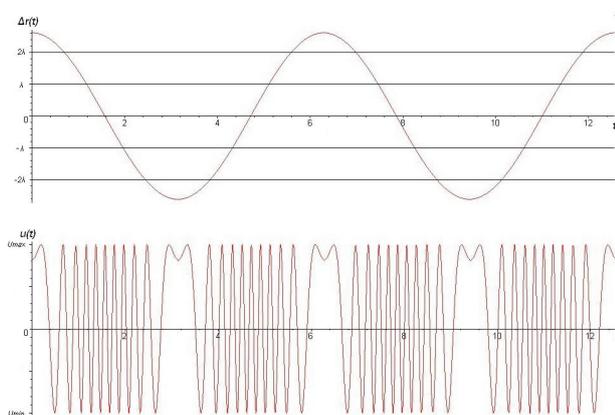


Рис. 3. Результаты теоретических расчетов поведения выходного напряжения $u(t)$ при гармонических колебаниях исследуемой поверхности

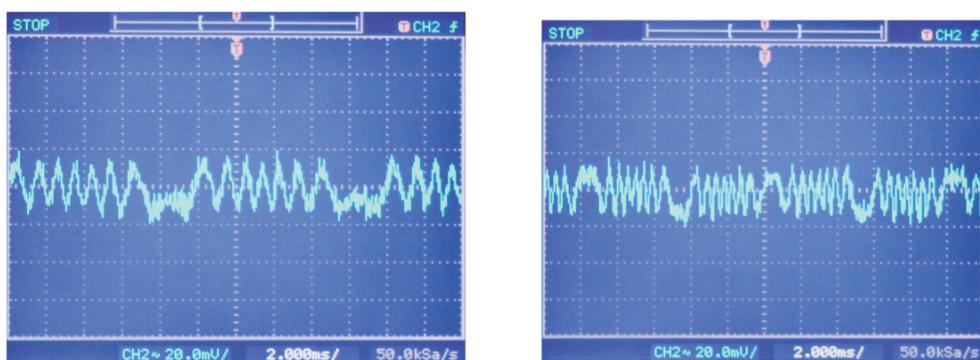


Рис. 4. Экспериментальные фотографии осциллограмм поведения выходного напряжения $u(t)$ быстродействующего фотодиода при колебании исследуемой поверхности с частотой: $a - 50$ Гц; $b - 100$ Гц

Экспериментальные результаты измерения частоты колебаний полностью совпадают с возбуждающей частотой, что также подтверждает применимость предлагаемого способа определения параметров колебаний.

Выводы

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования показали, что предложенный способ позволяет производить измерения параметров колебаний (частота, амплитуда) диффузно отражающей поверхности в реальном времени на основе регистрации изменения интенсивности одиночного спекла.

Дальнейшие исследования необходимо провести по оценке чувствительности и точности предлагаемого метода. Кроме того, необходимо оценить возможность использования предлагаемого метода при исследованиях динамики элементов конструкций в промышленных условиях.

Литература

- [1] Франсон М.М. Оптика спеклов. М.: Мир, 1980. 85 с.
- [2] Клименко И.С. Голография сфокусированного изображения и спекл-интерферометрия. М.: Наука, 1985. 113 с.
- [3] Власов Н.Г., Гинзбург В.М., Штанько А.Е. Способ интерференционных измерений в диффузно-когерентном излучении // Авторское свидетельство № 554467. G 01B 9/021.
- [4] Application of the Fourier Transform in Electronic Speckle Photography / Zhang Yuanpeng [et al.] // *Experimental Mechanics*. Mar 2002. № 42. P. 18–24.
- [5] Measurement of transverse vibrations/visualization of mode shapes in square plate by using digital speckle pattern interferometry and wavelet transform / S. Mirza [et al.] // *Optics and Lasers in Engineering*. January 2006. V. 44. № 1. P. 41–55.
- [6] Speckle correlation fringes denoising using stationary wavelet transform. Application in the wavelet phase evaluation technique / E.M. Barj [et al.] // *Optics & Laser Technology*. October 2006. V. 38. № 7. P. 506–511.
- [7] Time history speckle pattern under statistical view / R.A. Braga [et al.] // *Optics Communications*. May 2008. V. 281. № 9. P. 2443–2448.
- [8] Q -statistics in dynamic speckle pattern analysis / H.J. Rabal [et al.] // *Optics and Lasers in Engineering*. June 2012. V. 50. № 6. P. 855–861.
- [9] Осипов М.Н., Попов М.А. Измерения малых динамических смещений интерферометром Майкельсона со сферическими волновыми фронтами // *Компьютерная оптика*. 2007. Т. 31. № 4. С. 55–57.
- [10] Осипов М.Н., Попов М.А., Попова Т.А. Поведение выходного сигнала в системе измерения на основе оптоэлектронного интерферометра Майкельсона // *Ползуновский вестник*. 2011. № 3/1. С. 38–41.
- [11] Применение спекл-интерферометрии для регистрации акустического сигнала / М.Н. Осипов [и др.] // *Ползуновский вестник*. 2012. № 3/2. С. 87–92.
- [12] Осипов М.Н., Шапошников М.Ю. Применение кольцевой апертурной диафрагмы в спекл-интерферометрии // *Компьютерная оптика*. 2002. № 24. С. 110–113.
- [13] Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1973. 719 с.
- [14] Осипов М.Н., Щеглов Ю.Д. Оптоэлектронный спекл-интерферометр для определения полей перемещений // *Вестник Нижегородского университета*. 2011. № 4. Ч. 4. С. 1672–1675.

Поступила в редакцию 13/XI/2013;
в окончательном варианте — 13/XI/2013.

DEVELOPMENT OF DIGITAL SPECKLE OF INTERFEROMETRY FOR THE INVESTIGATION OF DYNAMIC PROCESSES IN REAL TIME

© 2013 M.N. Osipov, V.A. Khokhlov, A.N. Chekmenev³

This paper considers the development of speckle interferometry on the basis of analysis of behavior of intensity of a single speckle for the investigation of dynamic processes in mechanics. Optical scheme for the realization of proposed method of measurement is proposed. The restrictions imposed on the proposed optical scheme are considered. The estimate of the range of measurements of dynamic movements is given. Experimental results of parameters of measurements of surface vibrations are presented.

Key words: dynamic processes in mechanics, experimental methods in mechanics, non-destructive methods, coherent optics, speckle interferometry, processing and analysis of images and signals.

Paper received 13/*XI*/2013.

Paper accepted 13/*XI*/2013.

³Osipov Mikhail Nikolaevich (osipov7@yandex.ru), Khokhlov Vadim Alexandrovich (vadim.a.khokhlov@gmail.com), Chekmenev Anton Nikolaevich (a.chekmenev@samsu.ru) the Dept. of Security of Information Systems, Samara State University, Samara, 443011, Russian Federation.