УДК 539.3:621.375

НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ СПЕКЛ-ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ ОДИНОЧНОГО СПЕКЛА В НАУЧНЫХ И ПРИКЛАДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

© 2016 М.Н. Осипов, Ю.Д. Щеглов

Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королёва

Статья поступила в редакцию 11.11.2016

В данной статье представлены исследования по применению спекл-интерферометрии одиночного спекла для измерения динамических процессов в механике деформируемого твердого тела, как в научных, так и прикладных задачах. Предложено теоретическое обоснование предлагаемого метода исследований и представлены теоретические оценки ограничений его реализации. Рассмотрена оптическая схема реализации предложенного метода, которая позволяет одновременно регистрировать формы собственных колебаний и проводить измерения амплитуды этих колебаний. Представлены теоретические расчеты показывающие, что при измерении амплитуды колебаний необходимо учитывать расположение фотодатчика.

Ключевые слова: неразрушающие методы исследований, спекл-интерферометрия, измерения вибраций, резонансные колебания, форма колебаний, обработки сигнала.

ВВЕДЕНИЕ

Исследование элементов конструкций при динамических нагрузках связано с проблемой обеспечения вибрационной прочности, которая является важнейшей задачей при создании реальных объектов и механизмов. При экспериментальных исследованиях как статических, так и динамических процессов в элементах конструкций особое внимание в настоящее время уделяется бесконтактным методам измерений. Одними из основных бесконтактных методов являются оптические методы. Среди оптических методов в настоящее время особое внимание уделяется интерферометрическим методам с использованием когерентной оптики. Наиболее широко используются методы голографической и спекл-интерферометрии, которые позволяют проводить измерения на реальных объектах [1-4]. Методы голографической интерферометрии обладают существенным недостатком, так как им присуще собственные шумы – спекл-шум, связанный с использованием когерентного лазерного излучения. Спекл-шум снижает точность и диапазон измеряемых перемещений.

Спекл-интерферометрия основана на использовании спекл-шума для измерений и в настоящий момент является одним из основных оптических методов, как при фундаментальных исследованиях различных задач механики, так и при практическом контроле и разработке новых элементов конструкций в различных областях промышленности. Спекл-интерферометрия также является методом неразрушающих исследований, бесконтактным, и, следовательно, не влияющим на происходящие процессы и результаты измерений. Следует также отметить, что спекл-интерферометрия обладает интерферометрической точностью и не предъявляет жестких требований к оптической схеме по сравнению с голографической интерферометрией. Указанные характеристики спекл-интерферометрии позволяют широко использовать данный метод в различных сферах деятельности, как в научных интересах, так и прикладных сферах деятельности [5-10].

В работах [11-14] представлен новый метод спекл-интерферометрии на одиночном спекле, который наиболее применим для исследования вибрационных процессов в условиях приближенных к промышленным и в широком диапазоне амплитуд и частот. Однако в этих исследования не проанализировано влияние различных начальных условий на результаты измерений.

В данной работе представлены теоретических расчеты по выявлению влияния начальных условий на результаты измерений по предлагаемому методу – спекл-интерферометрия одиночного спекла.

ОСНОВЫ СПЕКЛ-ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ ОДИНОЧНОГО СПЕКЛА

Для реализации предложенного метода исследования динамики шероховатой поверхности под воздействием внешних сил предлагается следующая оптическая схема, представленная на рис. 1. Принцип действия устройства построенного по данной схеме описан в работе [13].

Осипов Михаил Николаевич, кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой безопасности информационных систем. E-mail: osipov7@yandex.ru Щеглов Юрий Денисович, ведущий инженер кафедры безопасности информационных систем. E-mail: sheglov@samsu.ru



Рис. 1. Оптическая схема



Рис. 2. Фотография сфокусированное изображение исследуемой поверхности

Особенность данной оптической схемы в том, что одновременно образуется сфокусированное изображение исследуемой поверхности, покрытое спекл-структурой с вторичными интерференционными полосами и в плоскости ПЗС-матрицы, и в плоскости точечного быстродействующего фотодетектора PD [11,12,14]. Фотография сфокусированное изображение исследуемой поверхности, покрытое спекл-структурой с вторичными интерференционными полосами, полученная экспериментально, представлена на рис. 2. Как видно на фотографии, период вторичных интерференционных полос может иметь различную величину в зависимости от угла схождения в плоскости изображения между опорным лучом и предметным лучом, отраженным от исследуемой поверхности. В качестве опорного пучка, при регистрации данной фотографии, использовалась сферическая волна.

Как было показано в работах [11,12,14], для эффективной регистрации динамики одиночного спекла необходимо выполнение следующих требований: ширина полос вторичной интерференционной картины *d* должна быть больше поперечного размера одиночного спекла *H*, а максимальный размер *h* точечного быстродействующего фотодетектора PD должны быть меньше размеров одиночного спекла. То есть, должно выполняться следующее соотношение:

$$d \ge H \ge h , \tag{1}$$

Выполнение данного условия достигается подбором параметров оптической схемы – диафрагма, фокусное расстояние, и подбором угла схождения между направлением опорного луча и направлением предметного луча, отраженного от исследуемой поверхности в плоскости изображения.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Изменение интенсивности света одиночного спекла, регистрируемое точечным быстродействующим фотодетектором PD, описывается следующим выражением [11,12,14]:

$$u(t) = A + B\cos[\delta\varphi - \varphi(t)], \qquad (2)$$

где *u*(*t*) – выходное напряжение с фотодетектора; *А* – выходное напряжение смещения, которое

связано со средней интенсивностью спекла;

B – амплитуда полезного выходного напряжения, которое определяется параметрами оптикоэлектронной схемы;

δφ – начальное значение разности фаз между опорным и объектным пучками в плоскости регистрации, оно может меняться, но остается постоянным во время измерений;

 $\phi(t)=\pm 2k\Delta r$ – изменение фазы спекла, которое связано с изменением оптического пути при динамических смещениях исследуемой поверхности; $k=2\pi/\lambda$ (λ – длина волны лазерного излучения); Δr – амплитуда колебаний исследуемой поверхности под действием акустического сигнала; знак + (плюс) означает перемещение исследуемой точки поверхности в направлении от измерительного блока в начальный момент измерений, а знак – (минус) означает перемещение исследуемой точки поверхности в направлении к измерительному блоку в начальный момент измерений.

Из анализа выражения (1), как показано в работах [11,12,14], следует, что поведение вы-

ходного напряжения с фотодетектора имеет сложный характер и при колебаниях исследуемой поверхности на величину меньше $\lambda/8$ выходное напряжение фотодетектора должно соответствовать данному перемещению, а при перемещениях больше $\lambda/8$, вид выходного напряжения фотодетектора не соответствует данному перемещению. При перемещениях больше $\lambda/8$, вид выходного напряжения фотодетектора имеет сложный характер и представляет набор осциллирующих пакетов. Число осцилляций внутри пакета пропорционально удвоенной амплитуде колебаний локальной точки исследуемой поверхности. Одна полная осцилляция внутри пакета соответствует перемещению локальной точки исследуемой поверхности на величину равную λ/2 для оптической схемы, в которой угол β между лучом, падающим на исследуемую поверхность, и отраженным от нее стремится к нулю. Это условие выполняется с большой точностью, так как лазерный излучатель и приемники располагаются в одном измерительном блоке на небольшом расстоянии друг от друга. Частота следования осциллирующих пакетов равна удвоенной частоте колебаний исследуемой поверхности. Характерный вид осциллограмм выходного напряжения фотодетектора для резонансных колебаний исследуемой поверхности с амплитудой меньше и больше $\lambda/8$ представлены на рис. 3 и рис. 4.

Однако в указанных работах не проанализировано влияние начального значения разности фаз δф между опорным и объектным пучками в плоскости регистрации одиночного спекла, на поведение выходного напряжения фотодетектора.

На рис. 5 и рис. 6 представлены графики теоретических расчетов выходного сигнала фотодетектора для $\delta \phi=0$, $\delta \phi=\pi/2$, $\delta \phi=\pi/4$, и значений



Рис. 3. Осциллограмма выходного напряжения фотодетектора при колебаниях с амплитудой меньше λ/8



Рис. 4. Осциллограмма выходного напряжения фотодетектора при колебаниях с амплитудой больше $\lambda/8$



Рис. 5. а) Форма колебаний исследуемой поверхности с амплитудой $a=\lambda/12$; б) вид выходного напряжения с фотодетектора при $\delta \phi = 0$; в) $\delta \phi = \pi/4$; д) $\delta \phi = \pi/2$



Рис. 6. а) Форма колебаний исследуемой поверхности с амплитудой $a=\lambda$; б) вид выходного напряжения с фотодетектора при $\delta \phi = 0$; в) $\delta \phi = \pi/4$; д) $\delta \phi = \pi/2$

амплитуд колеблющейся исследуемой поверхности $a=\lambda/12$, и $a=\lambda$. При расчетах принималось, что в начальный момент измерений смещение исследуемой точки поверхности происходит от измеряемого блока, то есть $\phi(t)$ принято со знаком (плюс). Значение напряжения выходного сигнала и амплитуда колебаний исследуемой точки поверхности представлены в относительных единицах.

Из представленных графиков следует, что при собственных колебаниях исследуемой поверхности с амплитудой меньше $\lambda/8$ выходное напряжение фотодетектора полностью соответствует колебаниям локальной точки исследуемой поверхности только при $\delta\phi=\pi/2$.

При δφ=0 амплитуда колебаний выходного напряжения фотодетектора соответствует амплитуде колебаний локальной точки исследуемой поверхности, а частота колебаний выходного напряжения фотодетектора вдвое больше частоты колебаний локальной точки исследуемой поверхности.

При δφ= *π*/4 происходит искажение амплитуды колебаний выходного напряжения фотодетектора относительно амплитуды колебаний локальной точки исследуемой поверхности с сохранением частотного соответствия.

При измерении собственных колебаний исследуемой поверхности с амплитудой колебаний больше $\lambda/8$, выходное напряжения фотодетектора имеет вид осциллирующих пакетов при всех значениях $\delta\phi$.

Количество осцилляций внутри пакета пропорционально удвоенной амплитуде собственных колебаний. Для данной оптической схемы одно полное колебание внутри пакета соответствует перемещению исследуемой точки поверхности на величину равную $\lambda/2$.

Период следования осциллирующих пакетов соответствует удвоенной частоте собственных колебаний исследуемой точки поверхности.

выводы

Таким образом, предлагаемый метод цифровой спекл-интерферометрии одиночного спекла позволяет регистрировать бесконтактным способом основные частотные характеристики собственных колебаний в широком амплитудном и частотном диапазонах. Верхняя граница измерения величины амплитуды и частоты колебаний определяется быстродействием фотодетектора и разрядностью регистрирующего модуля. Величина максимальной измеряемой амплитуды может составлять миллиметры, что существенным образом расширяет диапазон измеряемых перемещений по сравнению с известными методами спекл-интерферометрии. Величина максимальной измеряемой частоты может составлять десятки мегагерц, что также существенным образом расширяет диапазон измеряемых частот по сравнению с известными методами спекл-интерферометрии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. *Rastogi P.K.*, Digital Speckle Pattern Interferometry and Related Techniques, Publisher: Wiley. England. 2001. 384 p.
- Yamaguchi I., Holography, speckle, and computers // Optics and Lasers in Engineering // 2003. 39. P. 411-429.
- Caponero M.A., Pasqua P., Paolozzi A., Peron I. Use of holographic interferometry and electronic speckle pattern interferometry for measurements of dynamic displacements // Mechanical Systems and Signal Processing. 2000. 14(1), P. 49-62.
- 4. Santoyo F.M., Pedrini G., Schedin S., Tiziani H.J. 3D displacement measurements of vibrating objects with multi-pulse digital holography // J. Meas. Sci. Technol. 1999. №10, December. P. 1305-1308.
- Ioana Th. Nistea, Dan N. Borza. High speed speckle interferometry for experimental analysis of dynamic phenomena // Optics and Lasers in Engineering. 2013. 51. P. 453-459.
- Wang Wei-Chung, Jiong-Shiun Hsu. Investigation of vibration characteristics of bonded structures by timeaveraged electronic speckle pattern interferometry // Optics and Lasers in Engineering. 2010. 48, P. 958–965.
- 7. *Mohan N.K., Rastogi P.* Recent developments in digital speckle pattern interferometry // Optics and Lasers in Engineering. 2003.40. P. 439–445.
- 8. Yang L.X., Schuth M., Thomas D., Wang Y.H. Stroboscopic digital speckle pattern interferometry for vibration analysis of microsystem // Optics and Lasers in Engineering. 2009. 47, P. 252–258.
- 9. *Peter Martin, Steve Rothberg* Introducing speckle noise maps for Laser Vibrometry // Optics and Lasers in Engineering. 2009. 47, P. 431–442.
- Arai Y., Hirai H., Yokozeki S. High-resolution dynamic measurement using electronic speckle pattern interferometry based on multi-camera technology // Optics and Lasers in Engineering, 2008. 46, P. 733–738.
- Осипов М.Н., Хохлов В.А. Чекменев А.Н. Развитие цифровой спекл-интерферометрии для исследования динамических процессов в реальном времени // Вестник Самарского государственного университета. 2013. 9/2(110). С. 109-117.
- Osipov M.N., Chekmenev A.N., Sheglov Y.D. Paper template for digital speckle interferometry method for research of dynamic processes // Proceedings 13th International Conference on Fracture (ICF). 2013. 4. P. 2756-2763.
- Автоматизированный комплекс определения форм и частотных характеристик собственных колебаний / М.Н. Осипов, Н.А. Шарафутдинов, Ю.Д. Щеглов, И.Н. Фалилеев, М.Е. Федина// Известия Самарского научного центра РАН. 2015. Т.17. № 2(5). С. 1072-1075.
- 14. Determination of frequency characteristics of mechanical constructions in real time by speckle interferometry / *Michael Osipov, Nikita Sharafutdinov, Yury Sheglov, Ivan Falileev, Mariya Fedina //* Procedia Engineering. 2015. V. 106. P. 224–230.

SOME ASPECTS OF APPLICATION OF THE SPECKLE INTERFEROMETRY OF A SINGLE SPECKLE IN SCIENTIFIC AND APPLIED RESEARCH

© 2016 M.N. Osipov, Yu.D. Shcheglov

Samara National Research University named after Academician S.P. Korolev

This article presents a study on the application of speckle interferometry single speckle for measurements of dynamic processes in solid mechanics, both in scientific and applied problems. Theoretical study of the proposed method of research the theoretical assessment of its implementation constraints are presents. The optical scheme of the proposed method, which allows to simultaneously record the shapes of natural vibrations and to measure the amplitude of these vibrations, is presented. Theoretical calculations show that the measurement of the amplitude of oscillations is necessary to consider the location of the photodetector. *Keywords*: Non-destructive research methods, speckle interferometry, measurement of vibration, resonance oscillations, mode shapes of natural vibrations, signal processing.

Michael Osipov, Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor, Head at the Security of Information Systems Department. E-mail: osipov7@yandex.ru. Yuri Shcheglov, Leading engineer at the Security of Information Systems Department. E-mail: sheglov@samsu.ru