

Влияние помех на обработку выходного сигнала спекл-интерферометра на одиночном спекле

М.Д. Лимов¹, М.Н. Осипов¹, А.В. Линьков¹, Н.С. Знаменщикова¹, Д.А. Гнутов¹

¹Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Московское шоссе 34А, Самара, Россия, 443086

Аннотация. В работе рассматривается влияние внешних помех на обработку выходного сигнала спекл-интерферометра на одиночном спекле. Представлено теоретическое и экспериментальное обоснование применения спекл-интерферометра на одиночном спекле для исследования динамических процессов в элементах конструкций. Представлена оптическая схема спекл-интерферометра на одиночном спекле. На основании теоретических исследований определены основные ограничения, накладываемые на параметры оптической схемы. Предлагаемая оптическая схема позволяет одновременно определять, как форму колебаний исследуемого объекта, так и амплитуду колебаний от нескольких нанометров до сотен микрон и в широком частотном диапазоне – от нуля герц до десятков мегагерц. Показано, что при амплитудах колебаний исследуемого объекта меньше $\lambda/8$ (длина волны лазерного излучения) выходной сигнал спекл-интерферометра полностью соответствует по форме колебаниям исследуемой поверхности объекта. При амплитудах колебаний исследуемого объекта больше $\lambda/8$ выходной сигнал спекл-интерферометра не будет соответствовать форме колебаний этой поверхности, так как сигнал преобразуется в осциллирующие пакеты. Частота следования пакетов определяет частоту колебаний объекта, а количество осцилляций в пакете определяет амплитуду колебаний исследуемой поверхности независимо от влияния внешних шумов.

1. Введение

Исследование динамических процессов элементов механических конструкций осуществляются различными экспериментальными методами, как контактного, так и бесконтактного типа. Контактные методы исследования динамических процессов приводят к изменению частотных характеристик, как непосредственно самих измерительных систем, так и исследуемых объектов, что необходимо учитывать при дальнейших экспериментальных исследованиях и математическом моделировании. Особенно данные ограничения необходимо учитывать при исследовании динамических характеристик малогабаритных изделий.

Исходя из этого, в настоящее время широкое внимание уделяется развитию бесконтактных методов, особенно методам когерентной оптики – голографической и спекл-интерферометрии. Данные методы, как правило, не позволяют исследовать частотные характеристики элементов механических конструкций в реальном времени, так как при исследованиях в основном используются: метод усреднения во времени; метод двух экспозиций либо импульсный стробоскопический метод. Также из-за наличия собственных шумов при использовании когерентного излучения (зернистость интерференционных картин), возникают ограничения по

измеряемому диапазону перемещений, а также по точности и чувствительности измерений. Кроме того, эти шумы затрудняют обработку голографических и спекл-интерферограмм. Спекл-интерферометрия использует собственные шумы в качестве информационного сигнала для исследования поведения объектов, подверженных различным нагрузкам [1,2]. Спекл-интерферометрия в настоящее время широко используется при исследовании динамических процессов элементов конструкций, так как ей присущи меньшие ограничения накладываемые на оптическую схему и внешние условия применения [3-7].

В работах [8,9] представлен новый способ определения частотных характеристик механических конструкций в реальном времени с помощью спекл-интерферометрии одиночного спекла. В данных работах показано, что изменение интенсивности света одиночного спекла, регистрируемое точечным быстродействующим фотодетектором, позволяет производить измерения частотных характеристик механических конструкций в реальном времени и в широком диапазоне амплитуд и частот. Однако в этих работах не рассматривались вопросы влияния внешних шумов на результаты обработки выходного сигнала спекл-интерферометра на одиночном спекле.

В данной работе рассматривается влияние внешних помех на обработку выходного сигнала спекл-интерферометра на одиночном спекле при измерении частотных характеристик элементов конструкций.

2. Экспериментальная установка

Для реализации предлагаемого способа определения частотных характеристик механических конструкций в реальном времени с помощью спекл-интерферометрии одиночного спекла была разработана оптическая схема спекл-интерферометра, представленная на рисунке 1.

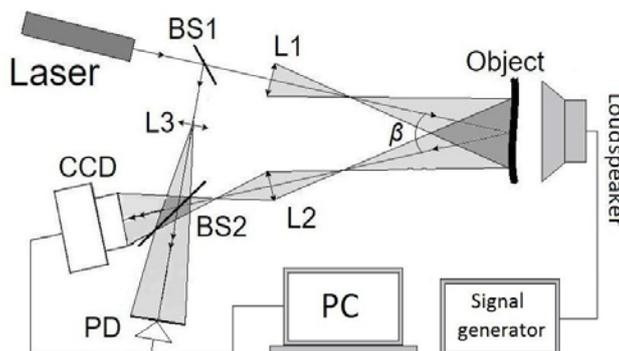


Рисунок 1. Оптическая схема спекл-интерферометра на одиночном спекле.

Принцип работы данной оптической схемы заключается в следующем. Луч лазера (Laser) направляется с помощью оптической системы (L1) на исследуемый шероховатый объект (Object), подверженный внешним нагрузкам. С помощью оптической системы (L2) освещенная лазерным излучением шероховатая поверхность исследуемого объекта (Object) фокусируется на приборе с зарядовой связью – ПЗС-матрица (CCD). Сфокусированное изображение поверхности будет покрыто субъективной спекл-структурой. Так как стандартные ПЗС-матрицы не являются быстродействующими фотодетекторами, способными регистрировать динамику спеклов в широком частотном диапазоне, то в оптической схеме предлагается использовать дополнительно точечный быстродействующий фотодетектор (PD), позволяющий анализировать изменение интенсивности одиночного спекла, связанной с динамическими процессами исследуемого объекта. Для этого с помощью делителя (BS2) сфокусированное изображение поверхности направляется также в плоскость расположения точечного быстродействующего фотодетектора (PD). С помощью делителей (BS1) и (BS2) часть

излучения (опорная волна) от лазера (Laser) направляется оптической системой (L3) в плоскость изображения исследуемого объекта покрытого субъективными спекл-структурами для создания вторичных интерференционных картин, позволяющих измерять изменение фазы спеклов, связанной с перемещением исследуемой поверхности. Результирующая интерференционная картина, одновременно регистрируется как ПЗС-матрицей (CCD), так и точечным быстродействующим фотодетектором. Вид результирующей интерференционной картины представлен на рисунке 2.

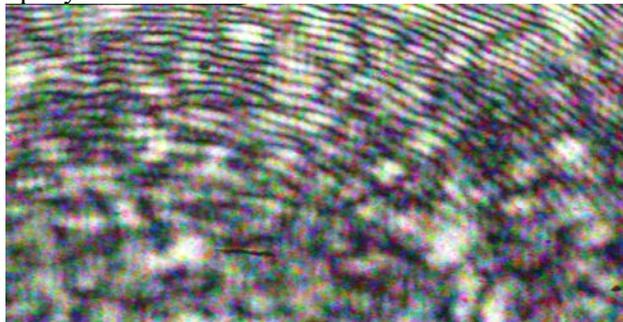


Рисунок 2. Фотография интерференционной картины.

Как видно из фотографии (рисунок 2) суммарная интерференционная картина состоит из спекл-структур, характеризующих поверхность исследуемого объекта, и покрытых вторичными интерференционными полосами, образованных за счет наложения опорной волны. Данная оптическая схема позволяет одновременно регистрировать форму колебаний (ПЗС-матрица) и амплитуду колебаний (точечный быстродействующий фотодетектор PD).

В данной оптической схеме угол β определяет чувствительность оптической системы при измерении величины перемещения исследуемого объекта [1]. При $\beta = 0$ чувствительность оптической системы максимальная. Данное условие для предлагаемой оптической схемы выполняется с большой точностью, так как излучающий (Laser) и приемный элемент (CCD) оптической схемы практически совмещены, а расстояние до исследуемого объекта гораздо больше расстояния между излучателем и приемником.

В работах [8,9] показано, что для эффективной регистрации динамики одиночного спекла необходимо выполнение следующих требований: ширина полос вторичной интерференционной картины должна быть больше поперечного размера одиночного спекла, а размеры точечного быстродействующего фотодетектора (PD) должны быть меньше размеров одиночного спекла. Выполнение данного условия достигается подбором параметров оптической схемы – апертура, фокус – и подбором угла схождения между направлением опорного луча и направлением отраженного луча, сходящихся в плоскости изображения.

3. Анализ влияния внешних помех на выходной сигнал спекл-интерферометра

В работах [8,9] показано, что изменение интенсивности света одиночного спекла, регистрируемое точечным быстродействующим фотодетектором, описывается следующим выражением:

$$u(t) = A + B \cos[\varphi(0) - \varphi(t)], \quad (1)$$

где $u(t)$ – выходное напряжение электрической схемы фотоприемника;

A – выходное напряжение смещения, которое связано со средней интенсивностью спекла;

B – амплитуда полезного выходного напряжения, которое определяется параметрами оптико-электронной схемы;

$\varphi(0)$ – начальное значение разности фаз между опорным и объектным пучками в плоскости регистрации, оно может меняться, но остается постоянным во время измерений;

$\varphi(t) = \pm 2k\Delta r$ – изменение фазы спекла, которое связано с изменением оптического пути при динамических смещениях исследуемой поверхности, где $k = 2\pi/\lambda$ (λ – длина волны лазера); Δr – смещение поверхности под воздействие внешней нагрузки.

В данных работах также теоретически показано, что выходной сигнал фотодетектора при амплитудах колебаний исследуемой поверхности равных, либо меньше $\lambda/8$, полностью повторяет форму колебаний исследуемой поверхности, а при амплитудах больше $\lambda/8$ происходит искажение выходного сигнала фотодетектора с образованием осциллирующих пакетов, повторяющихся с удвоенной частотой колебаний исследуемой поверхности.

Рассмотрим влияние внешних шумов на поведение выходного сигнала спекл-интерферометра. При теоретическом исследовании поведения выходного сигнала с фотодетектора предположим, что колебания исследуемой поверхности происходит по гармоническому закону, как при воздействии возбуждающей нагрузки, так и под воздействием шумов. В этом случае $\varphi(t)$ запишется в следующем виде:

$$\varphi(t) = 2k[a \sin(\Omega t) + b \sin(\Omega_1 t)], \quad (2)$$

где a – амплитуда колебаний исследуемого объекта под воздействием возбуждающей нагрузки;

Ω – частота колебаний;

b – амплитуда колебаний исследуемого объекта при воздействии шума;

Ω_1 – частота колебаний исследуемого объекта при воздействии шума.

На рисунках 3 и 4 представлены графики теоретических расчетов выходного напряжения фотодетектора в соответствии с формулой (1) с учетом выражения (2) при различных значениях a , b , Ω , Ω_1 .

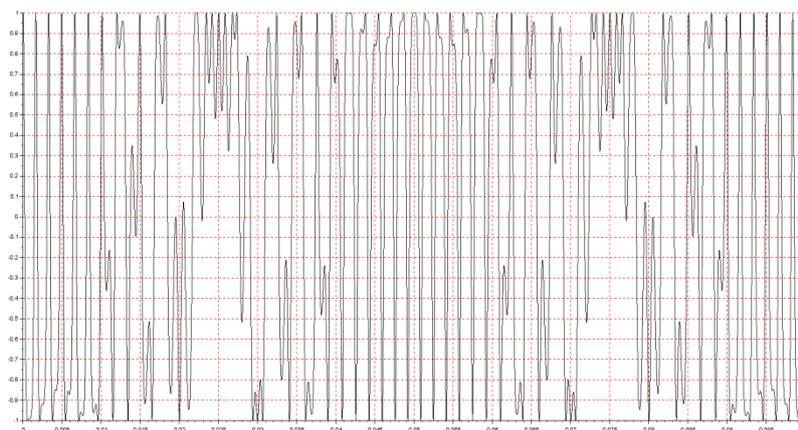


Рисунок 3. Вид выходного напряжения с фотодетектора при колебаниях исследуемого объекта с амплитудами $a=\lambda/12$, $b=5\lambda$; с частотами $\Omega=300$ Гц, $\Omega_1=10$ Гц.

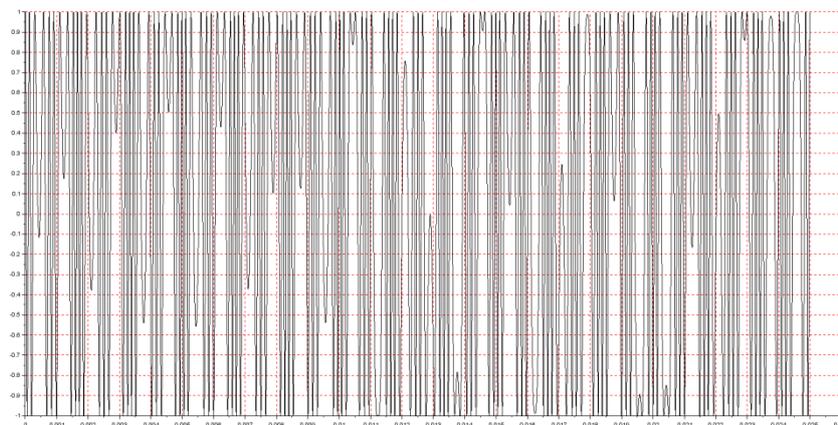


Рисунок 4. Вид выходного напряжения с фотодетектора при колебаниях исследуемого объекта с амплитудами $a=\lambda$, $b=5\lambda$, с частотами $\Omega=300$ Гц, $\Omega_1=10$ Гц.

Из графика поведения выходного напряжения с фотодетектора (рисунок 2) следует, что при амплитудах колебаний исследуемого объекта меньше $\lambda/8$ влияние внешних шумов

незначительно влияет на форму колебаний исследуемого объекта. Из графика (рисунок 3) поведения выходного напряжения с фотодетектора также следует, что при амплитудах колебаний исследуемого объекта более $\lambda/8$ выходное напряжение фотодетектора не будет соответствовать форме колебаний этого объекта, так как сигнал превращается в осциллирующие пакеты, на которые внешние шумы практически также не дают никакого вклада. Как показано в работах [8,9] частота следования пакетов определяет частоту колебаний объекта, а количество осцилляций в пакете определяет амплитуду колебаний исследуемой поверхности. Кроме того, необходимо отметить, что данный метод позволяет одновременно проводить измерения как формы колебаний, так и амплитуды колебаний элементов конструкций от нескольких нанометров до сотен микрон с интерферометрической точностью и в широком частотном диапазоне – от нуля герц до десятков мегагерц. Следует также отметить, что применение точечного быстродействующего фотодетектора позволяет регистрировать динамические процессы в элементах конструкций практически в реальном времени.

На рисунке 5 представлена экспериментальная фотография осциллограммы поведения выходного сигнала разработанного спекл-интерферометра на одиночном спекле регистрирующего колебания исследуемого объекта с частотой 300 Гц и амплитудой $13\lambda/4$ при наличии внешних шумов. В спекл-интерферометре на одиночном спекле использовался лазер с длиной волны $\lambda = 532$ нм.

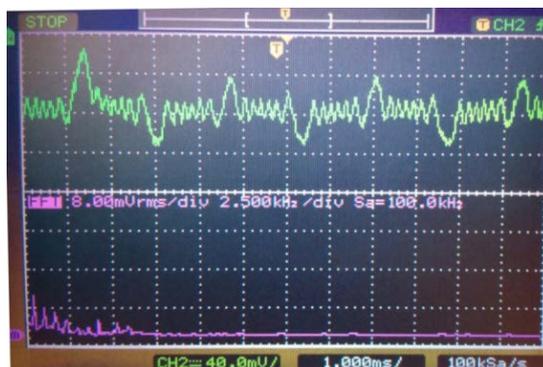


Рисунок 5. Фотография осциллограммы.

Фотография осциллограммы, представленная на рисунке 4, полностью подтверждает проведенные теоретические исследования о поведении выходного сигнала спекл-интерферометра на одиночном спекле при наличии внешних шумов.

4. Заключение

Представленные теоретические и экспериментальные исследования по применению нового метода измерения частотных характеристик элементов конструкций на основе спекл-интерферометрии одиночного спекла показали, что предлагаемый метод применим при наличии внешних помех, что очень важно с точки зрения промышленного использования.

5. Благодарности

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке грантов РФФИ № 15-08-06330-а и № 16-08-00571-а.

6. Литература

- [1] Jones, R. Holographic and Speckle Interferometry / R. Jones, C. Wykes. – Cambridge University Press, 1983. – 342 p.
- [2] Rastogi, P.K. Digital Speckle Pattern Interferometry and Related Techniques / P.K. Rastogi. – Wiley, England, 2001. – 368 p.
- [3] Yamaguchi, I. Holography, speckle, and computers. / I. Yamaguchi // Optics and Lasers in Engineering. – 2003. – Vol. 39(4). – P. 411-429.

- [4] Mohan, N.K. Recent developments in digital speckle pattern interferometry / N.K. Mohan, P. Rastogi, G. Editorial // *Optics and Lasers in Engineering*. – 2003. – Vol. 40. – P. 439-445.
- [5] Dai, X. Vibration measurement based on electronic speckle pattern interferometry and radial basis function / X. Dai, X. Shao, Z. Geng, F. Yang, Y. Jiang, X. He // *Optics Communications*. – 2015. – Vol. 355. – P. 33-43.
- [6] Trillo1, C. Multimode vibration analysis with high-speed TV holography and a spatiotemporal 3D Fourier transform method / C. Trillo1, Á.F. Doval, F. Mendoza-Santoyo, C. Pérez-López, J.L. Deán // *Optics Express*. – 2009. – Vol. 17(20). – P. 18014-18025.
- [7] Nistea, I.Th. High speed speckle interferometry for experimental analysis of dynamic phenomena / I.Th. Nistea, D.N. Borza // *J. Optics and Lasers in Engineering*. – 2013. – Vol. 51. – P. 453-459.
- [8] Osipov, M.N. Paper template for digital speckle interferometry method for research of dynamic processes / M.N. Osipov, A.N. Chekmenev, Y.D. Sheglov // *Proceedings 13th International Conference on Fracture (ICF 2013)*. – 2013. – Vol. 4. – P. 2756-2763.
- [9] Osipov M. Determination of frequency characteristics of mechanical constructions in real time by speckle interferometry / M. Osipov, N. Sharafutdinov, Y. Sheglov, I. Falileev, M. Fedina // *Journal Procedia Engineering*. – 2015. – Vol. 106. – P. 224-230. DOI:10.1016/j.proeng.2015.06.028.

The influence of a noise on the processing of the output signal of the speckle interferometer on a single speckle

M.D. Limov¹, M.N. Osipov¹, A.V. Linkov¹, N.S. Znamencshikova¹, D.A. Gnutov¹

¹Samara National Research University, Moskovskoe Shosse 34A, Samara, Russia, 443086

Abstract. The influence of external noise on the processing of the output signal of a speckle interferometer on a single speckle is considered. The theoretical and experimental substantiation of the application of the speckle interferometer on a single speckle for the study of dynamic processes in elements of construction is presented. The optical scheme of a speckle interferometer on a single speckle is shown. On the basis of theoretical studies, the main limitations imposed on the parameters of the optical circuit are determined. The proposed optical scheme allows simultaneously to determine both the vibration mode of the object under study and the amplitude of the oscillations from several nanometers to hundreds of microns and in a wide frequency range from zero Hz to tens of megahertz. It is shown that for the amplitude of the vibrations of the investigated object is less than $\lambda/8$ (λ laser wavelength), the output signal of the speckle interferometer fully corresponds to the shape of the vibrations of the investigated object surface. When the amplitude of the vibrations of the object under study is greater than $\lambda/8$, the output signal of the speckle interferometer will not correspond to the shape of the vibrations of this surface, since the signal is transformed into oscillating packets. The repetition frequency of the packets determines the frequency of the vibrations of the object, and the number of oscillations in the packet determines the amplitude of the vibrations of the investigated surface independently from the influence of external noise.

Keywords: Interference, Speckle structure, Speckle interferometry.