

УДК 519.24

ПРИМЕНЕНИЕ СПЕКЛ-ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ АКУСТИЧЕСКОГО СИГНАЛА

М.Н. Осипов, И.Н. Фалилеев, А.Н. Чекменев, Ю.Д. Щеглов

В данной работе рассматривается применение спекл-интерферометрии для регистрации слабых динамических смещений поверхности подверженной воздействию акустического сигнала. Предложена оптическая схема с использованием волоконно-оптических элементов для регистрации спекл-структур, модулированных акустическим сигналом. Приведена оценка диапазона применимости предлагаемой лазерной оптоэлектронной системы регистрации акустического сигнала на основе спекл-интерферометрии.

Ключевые слова: динамические смещения, интерферометрия, спекл-интерферометрия, акустический сигнал, лазерные микрофоны.

Введение

На современном этапе существует большое количество средств съема акустической информации. Наиболее распространенными среди них являются микрофоны, работающие на основе механоэлектрического способа преобразования звуковых волн. Во всех схемах съема акустической информации на основе механоэлектрических микрофонов необходимо выполнение следующих условий: либо открытое пространство для прослушивания при сравнительно небольших расстояниях, либо плотный контакт микрофона с анализируемым объектом.

В настоящее время особое внимание уделяется лазерным системам регистрации малых динамических смещений, так как они не предусматривают прямого контакта с исследуемой поверхностью, подверженной динамическим смещениям. Одним из источников динамических смещений могут являться акустические (речевые) сигналы. Принцип работы лазерных систем заключается в том, что отраженное лазерное излучение от исследуемой поверхности модулируется источником акустического сигнала. Модулированное излучение фиксируется фотодетектором, что позволяет на выходе получить исходную акустическую информацию.

Однако в основном все эти системы работают на основе регистрации зеркально отраженного лазерного излучения. Использование таких лазерных систем на больших расстояниях является затруднительным.

Среди лазерных систем особенно следует выделить интерферометрические системы, обладающие более высокой чувствительностью.

Оптические, в том числе и лазерные, интерферометры требуют выполнения ряда условий, ограничивающих их применение: отражающая исследуемая поверхность должна быть оптически гладкой; требуется жесткая взаимная юстировка элементов оптической системы. Следует также отметить, что интерферометрические методы требуют использования лазеров с большой длиной когерентности, что накладывает дополнительные ограничения при использовании данных систем в реальных условиях. Хорошо известно, что применение когерентного излучения в интерферометрии приводит к возникновению собственных шумов, которые называются спекл-структурами, приводящих к уменьшению чувствительности и точности измерений.

В данной работе рассматривается применение одной из особенностей когерентного излучения – спекл-структур для регистрации малых акустических сигналов.

Основные положения

Лазерные методы регистрации акустической информации в основном построены на фиксации зеркальной составляющей отраженного оптического излучения от исследуемой поверхности возмущенной акустическим сигналом, что, как было сказано выше, ограничивает применимость данных методов. Как правило, вибрирующие объекты под воздействием акустического сигнала не всегда являются оптически гладкими, а в основном являются шероховатыми, поэтому возникает задача использования рассеянного излучения от этих объектов в качестве информационного сигнала, несущего информацию об их динамике.

При освещении лазерным когерентным источником света оптически шероховатой поверхности за счет рассеяния в пространстве образуется сложная интерференционная картина, называемая спекл-структурой (с английского speckle — пятно, зерно). Характерный вид спекл-структуры представлен на рисунке 1.

Образование спекл-структуры можно объяснить следующим образом [1]: каждая точка шероховатой поверхности при отражении лазерного излучения может быть представлена источником вторичных сферических волн со случайным распределением фаз. Ин-

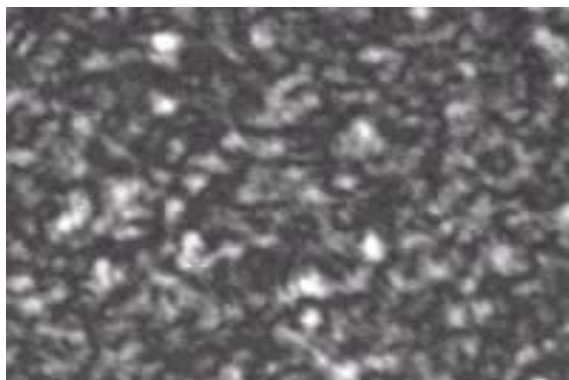


Рисунок 1 – Фотография спекл-структуры

терференция этих волн в пространстве и образует спекл-структуру. Различают два вида спекл-структур: объективные - образованные в пространстве за счет интерференции множества отраженных лучей от шероховатой поверхности, которые могут быть зарегистрированы непосредственно без оптической системы на фотоматериале и субъективные - образованные и зафиксированные на фотоматериале с помощью оптической системы в плоскости изображения исследуемой шероховатой поверхности.

Размеры спеклов в объективных и субъективных (при расстоянии до исследуемой поверхности много больше фокусного расстояния оптической системы) спекл-структурах (продольные — L и поперечные — H) оцениваются по известным формулам [1]:

$$L = \frac{4\lambda}{\alpha^2}, \quad (1)$$

$$H = 1,22 \frac{\lambda}{\alpha}, \quad (2)$$

где λ — длина волны лазерного излучения, используемого для освещения исследуемой поверхности,

α — отношение диаметра освещенной области исследуемой поверхности к расстоянию от исследуемой поверхности до точки регистрации спекла (для объективных спекл-структур),

α — отношение диаметра входной апертуры к фокусному расстоянию оптической системы (для субъективных спекл-структур).

Динамические процессы, возникающие на поверхности исследуемого объекта, приводят к изменению спекл-структуры в пространстве и во времени, что связано с изменением фазы отраженных вторичных сферических волн. Следовательно, по анализу пространственно-временного поведения спекл-структур можно определить динамические процессы, происходящие с исследуемой поверхностью.

Предлагаемое решение

Оценим возможность измерения динамических процессов, происходящих с исследуемой поверхностью, за счет изменения пространственных размеров спекла.

Из выражений (1) и (2) следует, что размеры субъективных спекл-картин не зависят от динамики исследуемой поверхности, так как α константа, и, следовательно, связаны только с характеристиками оптической системы. Таким образом, субъективные спекл-структуры не позволяют регистрировать динамические процессы исследуемой поверхности за счет измерения размеров спекла. Однако, регистрация субъективной спекл-структуры позволяет жестко привязать точки исследуемой шероховатой поверхности к самой спекл-структуре и также увеличить интенсивность регистрируемого спекла на фотодетекторе.

Проведем аналогичную оценку для объективных спеклов. При динамических перемещениях исследуемой поверхности изменения размеров спекла для объективных спекл-структур согласно выражениям (1) и (2) будут определяться следующими соотношениями:

$$L = \frac{4\lambda(r \pm \Delta r)^2}{D^2}, \quad (3)$$

$$H = 1,22 \frac{\lambda(r \pm \Delta r)}{D}, \quad (4)$$

где r – расстояние от исследуемой поверхности до точки регистрации спекла,

$\pm \Delta r$ – величина перемещения исследуемой поверхности,

D – диаметр освещенной области исследуемой поверхности.

Из анализа выражений (3) и (4) следует, что поперечный и продольный размеры спекла, при перемещениях исследуемой поверхности, будет меняться на очень малую величину, так как $\Delta r/r \rightarrow 0$ при реальных условиях измерений. Следовательно, как и в случае с субъективными спеклами, определить динамику исследуемой поверхности за счет измерения размеров объективных спеклов также практически невозможно.

Рассмотрим возможность определения динамики исследуемой поверхности за счет регистрации изменения интенсивности спекла. Изменение интенсивности спекла связано с изменением его фазы, которая зависит от изменения оптического пути при смещении исследуемой поверхности. Изменение значения фазы спекла на $\pm \pi(2n+1)$, где $n=0,1,2,\dots$, приводит к изменению интенсивности спекла с минимального значения на максимальное или на оборот.

Для регистрации изменения фазы спекла необходимо использование опорного лазерного излучения, которое накладывается на спекл-структуру, в результате чего образуется вторичная интерференционная картина в виде полос (рисунок 2).

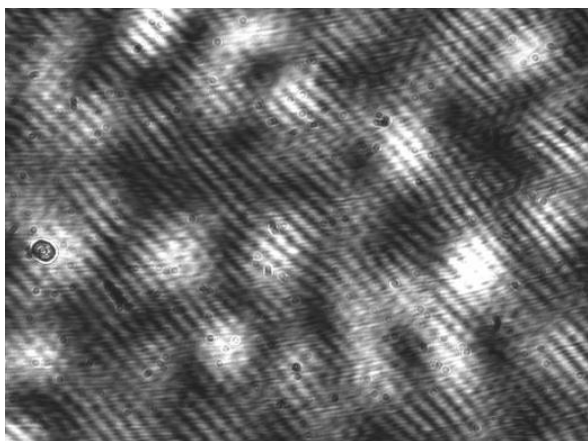


Рисунок 2 – Фотография вторичной интерференционной картины

Ширина вторичных интерференционных полос d определяется хорошо известным выражением [2]:

$$d = \frac{\lambda}{2 \sin\left(\frac{\Theta}{2}\right)}, \quad (5)$$

где Θ – угол схождения между опорным лазерным излучением и рассеянным лазерным излучением, образующим спекл структуру.

Для эффективной регистрации динамики спекл-структуры необходимо выполнить следующие условия: ширина полос вторичной интерференционной картины должна быть согласована с размерами спекл-структуры, а также с размерами чувствительного элемента фотодетектора.

Для согласования размера спекла с размерами чувствительного элемента фотодетектора необходимо, чтобы выполнялось следующее соотношение:

$$H \geq h, \quad (6)$$

где h – максимальное значение из размеров чувствительного элемента фотодетектора. Выполнение данного условия достигается подбором параметра α оптической системы, как следует из выражения (2).

Для того чтобы чувствительный элемент фотодетектора смог различать изменение фазы спекл-структуры необходимо, чтобы ширина вторичных интерференционных полос была больше максимального значения из размеров чувствительного элемента фотодетектора, т.е. выполнялось следующее соотношение:

$$d \geq h, \quad (7)$$

Таким образом, выполнение условий (6) и (7) приводит к тому, что интенсивность спекла, как целого, будет меняться от минимального до максимального значения в зависимости от колебаний исследуемой поверхности.

Реализация предлагаемого решения

Реализация данного способа регистрации колебаний исследуемой поверхности под воздействием акустического сигнала предлагается осуществить по оптической схеме, представленной на рисунке 3. Принцип работы данной оптической схемы заключается в следующем. Луч лазера Л направляется с помощью оптической системы Л1 на исследуемый шероховатый объект О, подверженный динамическим смещениям под воздействием акустического сигнала.

С помощью оптической системы Л2 шероховатая поверхность исследуемого объек-

та О, освещенная лазерным излучением, фокусируется на приборе с зарядовой связью (ПЗС-матрица). Как сказано выше, сфокусированное изображение поверхности будет покрыто субъективной спекл-структурой. Подчеркнем, что, как отмечалось выше, в

плоскости ПЗС-матрицы фиксируется изображение объекта покрытое спеклами, что позволяет наблюдать объект в реальном времени при использовании систем видеорегистрации.

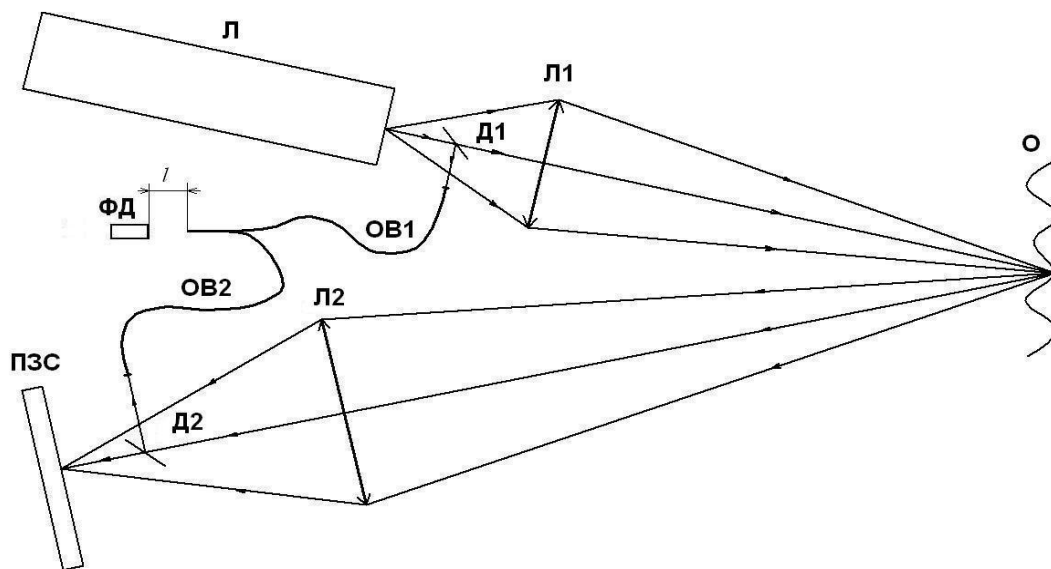


Рисунок 3 - Оптическая схема регистрации акустического сигнала

Так как, стандартные ПЗС-матрицы не являются быстродействующими фотодетекторами, которые способны регистрировать динамику спеклов в акустическом диапазоне, то в анализируемой схеме предлагается использовать дополнительно быстродействующий фотодетектор ФД, позволяющий анализировать динамику спеклов в акустическом диапазоне. Для выделения единичного спекла, с помощью делителя Д2 изображение спекла направляется на входной торец оптоволоконна ОВ2, выходной торец которого согласован с быстродействующим фотодетектором ФД. Диаметр сердцевинки оптоволоконна ОВ2 должен быть согласован с поперечными размерами спекла, то есть должно выполняться соотношение (6). Поперечные размеры спекла полностью соизмеримы с диаметром сердцевинки одномодовых оптоволокон при использовании стандартных оптических систем.

Для создания опорной волны с помощью делителя Д1 часть излучения от лазера Л направляется в оптоволоконно ОВ1, выходной торец которого также согласован с быстродействующим фотодетектором ФД. Выходные концы оптоволокон совмещены, а торцы располагаются в одной плоскости. Выходное излучение из оптоволокон ОВ1 и ОВ2 создает в пространстве спекл-структуру, покрытую интерференционными полосами, как описано выше (рис. 2). Быстродействующий фотодетектор ФД располагается на расстоянии l от торцов оптоволокон ОВ1 и ОВ2 таким образом, чтобы выполнялись условия (6) и (7).

При выполнении выше описанных условий, изменение интенсивности в спекл-структуре на входе фотодетектора преобразуется в изменение выходного напряжения фотодетектора, которое записывается следующим образом [3]:

$$u(t) = A + B \cos[\varphi(0) - \varphi(t)], \quad (8)$$

где $u(t)$ – выходное напряжение электрической схемы фотодетектора,

A – постоянная составляющая напряжения смещения на выходе электрической схемы, которая связана с усредненным значением изменения интенсивности вторичной интерференционной картины,

B – амплитуда полезного выходного напряжения, которая определяется параметрами оптоэлектронной схемы,

$\varphi(0)$ – начальное значение разности фаз между опорным излучением и рассеянным лазерным излучением, образующим спекл структуру,

$\varphi(t)$ – изменение фазы в спекл-структуре, связанное с изменением оптического пути при динамических смещениях исследуемой поверхности.

Из анализа формулы (8) видно, что изменение выходного напряжения фотодетектора зависит от изменения фазы $\varphi(t)$, характеризующей динамику спекла под воздействием акустического сигнала. 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 – $u(t)_{\max}$.

Из анализа выражения (8) следует, что изменение выходного напряжения от минимального до максимального соответствует смещению исследуемой поверхности на величину равную $\lambda/4$.

Как следует из работы [3], при перемещениях постоянного направления - не знакопеременных - для определения величины полного перемещения достаточно определить количество изменений интенсивностей спекла от максимального до минимального. При знакопеременных перемещениях, что соответствует виброакустическим сигналам, характер выходного сигнала фотодетектора имеет особенности.

Анализ выражения (8) показывает, что при колебаниях исследуемой поверхности с амплитудами меньше или равно $\lambda/8$ выходное напряжение фотодетектора соответствует форме колебаний этой поверхности. При амплитудах колебаний исследуемой поверхности более $\lambda/8$ выходное напряжение фотодетектора не будет соответствовать форме колебаний этой поверхности, что потребует

разработки дополнительного алгоритма расшифровки выходного сигнала фотодетектора.

Для регистрации колебаний без дополнительной обработки выходного сигнала, как следует из выражения (8), необходимо выбрать $\varphi(0)$ равным $\frac{\pi}{2}(2n+1)$ где $n=0,1,2,\dots$,

Данное условие означает, что в начальный момент измерений выходное напряжение с фотодетектора должно быть установлено таким образом, чтобы его значение соответствовало величине равной $(u(t)_{\max} - u(t)_{\min})/2$, то есть $u(0)=A$. Это достигается соответствующим изменением фазы опорного пучка. При этих условиях амплитуда измеряемых колебаний исследуемой поверхности под воздействием акустического сигнала будет соответствовать величине равной $\lambda/8$.

Оценка диапазона измерений

Проведем оценку возможного диапазона измерения перемещений, не требующего разработки дополнительного алгоритма расшифровки выходного сигнала. Предположим, что оптоэлектронная схема устройства имеет чувствительность $0,1(u(t)_{\max} - u(t)_{\min})$. Тогда минимальное значение измеряемого смещения исследуемой поверхности будет равно $\lambda/40$. Таким образом, чувствительность предлагаемого способа измеряемых перемещений исследуемой поверхности под воздействием акустического сигнала составляет $\lambda/40$. При использовании лазерного излучения с длиной волны $\lambda=1$ мкм, предлагаемая оптическая система на основе анализа динамики спекл структур сможет осуществлять измерения смещений исследуемой поверхности с чувствительностью 25 нм.

Проведем оценку возможного диапазона измерения амплитуд звуковых колебаний, не требующего разработки дополнительного алгоритма расшифровки выходного сигнала. Предположим, что оптоэлектронная схема устройства имеет чувствительность 0,1 от значения амплитуды колебаний. Тогда минимальное значение измеряемой амплитуды колебаний исследуемой поверхности будет равно $\lambda/80$. Таким образом, диапазон измеряемых значений амплитуд колебаний исследуемой поверхности под воздействием акустического сигнала лежит в пределах от $\lambda/80$ до $\lambda/8$. При использовании лазерного излучения с длиной волны $\lambda=1$ мкм, фотодетектор сможет распознавать амплитуды колебаний ис-

следуемой поверхности в пределах от 12.5 нм до 125 нм.

Использование методов цифровой обработки сигнала позволит повысить чувствительность предлагаемого способа как минимум на порядок.

Выводы

В данной работе рассмотрен способ регистрации акустической информации с использованием анализа динамики спекл-структур. Проведен теоретический анализ условий, накладываемых на спекл-структуры и фотодетектор, которые необходимы для оптимального решения поставленной задачи. Преимущество предлагаемого способа заключается в том, что его использование не требует тщательной юстировки элементов оптической системы и позволяет частично избавиться от помех.

Следует также отметить, что предлагаемый способ регистрации акустической информации с использованием анализа динамики спекл-структур может быть использован

при исследовании малых вибрационных смещений в различных областях машиностроения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Франсон М. Оптика спеклов [Текст] /. –М.: Мир, 1980. – 172 с.
2. Борн М. Технологии программирования на Java 2 [Текст] / М. Борн, Э. Вольф. – М.: Наука, 1973. – 720 с.
3. Осипов М.Н. Поведение выходного сигнала в системе измерения на основе оптоэлектронного интерферометра Майкельсона [Текст] / Осипов М.Н., Попов М.А., Попова Т.А. // Ползуновский вестник. – 2011. - № 3/1. – С. 38-41.

К ф.-м. н., доцент Осипов М.Н., osipov@samsu.ru; магистр Фалилеев И.Н., ivan.falileev@rambler.ru; студент Чекуменев А.Н., a.chekmenev@mail.ru; вед. инженер Щеглов Ю.Д. - кафедра безопасности информационных систем Самарского государственного университета, тел. 8-846-337-99-41.