

ИЗМЕРЕНИЯ МАЛЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СМЕЩЕНИЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРОМ МАЙКЕЛЬСОНА СО СФЕРИЧЕСКИМИ ВОЛНОВЫМИ ФРОНТАМИ

М.Н. Осипов, М.А. Попов

Самарский государственный университет

Аннотация

В статье представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований применения лазерного оптоэлектронного интерферометра Майкельсона со сферическими волновыми фронтами для измерения малых динамических смещений. Рассмотрен оптоэлектронный метод регистрации сигнала лазерного интерферометра и предложен алгоритм обработки сигнала. Данная методика позволяет определить значение и величину динамических смещений с высокой чувствительностью и точностью.

Введение

Значительный интерес вызывает проблема разработки и применения неразрушающих интерферометрических методов для исследования динамических процессов, происходящих в элементах конструкций [1-3]. Одной из основных задач при этом является правильное описание процесса записи и расшифровки интерференционных картин, что необходимо для разработки алгоритмов и способов автоматизированной обработки изображений.

В статье рассматривается оптоэлектронный лазерный интерферометр со сферическими волновыми фронтами на основе интерферометра Майкельсона и алгоритм обработки сигнала для измерения малых динамических смещений с высокой точностью в нанодиапазоне.

Постановка эксперимента и теоретическое обоснование

Для измерения динамических смещений предлагается использовать модифицированный оптоэлектронный лазерный интерферометр Майкельсона со сферическими волновыми фронтами. Образование сферических волновых фронтов достигается тем, что опорное зеркало и исследуемая поверхность находятся в фокусе линзы установленной на входе интерферометра Майкельсона. Интерференционная картина, наблюдаемая в такой оптической схеме, состоит из концентрических интерференционных полос. Опорное зеркало интерферометра имеет возможность перемещения вдоль оптического пути опорного луча, что позволяет вводить необходимый начальный фазовый сдвиг при образовании интерференционной картины полос. Перемещение исследуемой поверхности приводит к динамическому изменению интерференционной картины полос. Выравнивание оптических путей в плечах интерферометра приводит к образованию широких концентрических интерференционных полос, что упрощает их регистрацию точечным быстродействующим фотодиодом. Для измерения динамических смещений, происходящих с большой частотой, лучше всего применять *p-i-n* или лавинный фотодиоды.

Рассмотрим теоретические аспекты и алгоритм, описывающие процесс образования и обработки сигнала при исследовании динамических процессов

по предложенной оптической схеме модернизированного интерферометра Майкельсона.

В общем случае распределение интенсивности в интерференционной картине описывается следующим выражением:

$$f(x, y, z) = a(x, y, z) + b(x, y, z) \cos(\varphi(x, y, z, t)), \quad (1)$$

где $a(x, y, z)$ – средняя значение интенсивности в интерференционной картине, $b(x, y, z)$ – амплитуда изменения интенсивности в интерференционной картине, $\varphi(x, y, z, t)$ – значение разности фаз между волновыми фронтами в точке наблюдения интерференционной картины x, y, z в момент времени t .

Так как фотодиод, регистрирующий распределение интенсивности в интерференционной картине, можно считать точечным, то при расположении его на оптической оси интерферометра Майкельсона, уравнение (1) может быть переписано относительно одной координатной оси, которая расположена вдоль оптической оси интерферометра. Предположим, что это ось x , тогда уравнение (1) запишется в следующем виде:

$$f(x, t) = a(x) + b(x) \cos\left\{\frac{4\pi}{\lambda}(x_2(t) - x_1)\right\}, \quad (2)$$

где x - координата точки, в который расположен фотодиод, x_1 - длина оптического пути опорного плеча интерферометра, которая может регулироваться при настройке интерферометра, $x_2(t)$ - изменяющаяся во времени длина оптического пути объектного плеча интерферометра, λ - длина волны лазерного излучения.

Изменение оптического пути объектного плеча интерферометра, вследствие перемещения исследуемой поверхности, запишем в следующем виде:

$$x_2(t) = x_0 - s(t), \quad (3)$$

где x_0 - начальная длина объектного плеча интерферометра в момент времени $t = 0$, $s(t)$ - функция, описывающая смещение исследуемой поверхности относительно ее начального положения в точке x_0 . Предположим также, что $s(0) = 0$.

Тогда уравнение (2) можно записать в следующем виде:

$$f(x, t) = a(x) + b(x) \cos \left\{ \frac{4\pi}{\lambda} (x_0 - x_1) - \frac{4\pi}{\lambda} s(t) \right\} =$$

$$= a(x) + b(x) \cos \{ \varphi(0) - \varphi(t) \}, \quad (4)$$

где $\varphi(0) = 4\pi(x_0 - x_1)/\lambda$ - начальное значение разности фаз, которая является параметром интерферометра и может изменяться и контролироваться в процессе настройки интерферометра, $\varphi(t) = 4\pi s(t)/\lambda$ - изменение фазы связанное с изменением оптического пути в объектной плече интерферометра вследствие движения исследуемой поверхности.

Из анализа уравнения (4) следует, что величину смещения исследуемой поверхности можно определить следующим выражением:

$$s(t) = \frac{\lambda}{2} \{ N(t) + \Delta(t) \}, \quad (5)$$

где $N(t)$ - целое число интерференционных полос, проходящих через чувствительный элемент фотодиода, или иначе это - целая часть порядка интерференционной полосы, $\Delta(t)$ - дробная часть порядка интерференционной полосы.

Алгоритм обработки сигнала

В общем случае, вычисление величины и знака смещения по приращению фазы может быть проведено относительно любого значения начальной фазы $\varphi(0)$. Но такой подход усложняет процесс автоматизации обработки выходного сигнала с фотодиода и потребует различных алгоритмов, которые будут зависеть от значения начальной разности фаз, а также от направления смещения.

Проанализируем процесс формирования выходного сигнала на фотодиоде с целью выбора эффективного алгоритма его обработки. Изменение интенсивности интерференционной картины на входе фотодиода, описываемое уравнением (4), преобразуется в изменение выходного напряжения, что можно записать следующим образом:

$$u(t) = kf(x) = A + B \cos \{ \varphi(0) - \varphi(t) \}, \quad (6)$$

где $u(t)$ - выходное напряжение электрической схемы фотодиода, k - коэффициент преобразования электрической схемы, A - постоянная составляющая напряжения смещения на выходе электрической схемы, которое связана с усредненным значением изменения интенсивности интерференционной картины полос, B - амплитуда полезного выходного напряжения, связанная с движением исследуемой поверхности.

Из уравнения (6) следует, что изменение интенсивности интерференционной картины в данной точке пространства (за счет смещения исследуемой поверхности) приводит к циклическому изменению, выходного напряжения с фотодиода от значения u_{\max} до u_{\min} . Вследствие этого, и согласно уравнениям (4) и (6), алгоритм обработки выходного сигнала, который не зависит от направления смещения, требует выбора рабочей начальной разности фаз $\varphi(0)$

равной $\pi/2$. Такое условие обеспечивается смещением опорного зеркала интерферометра Майкельсона. Соответствующий фазовый сдвиг равный $\pi/2$, выбирается таким образом, чтобы выходное напряжение с фотодиода было равно постоянной составляющей напряжения смещения A , которое, очевидно, должно удовлетворять следующему соотношению:

$$u_0 = \frac{u_{\max} + u_{\min}}{2}. \quad (7)$$

При данном выборе фазового сдвига, также следует, что напряжение u_0 является нулевым уровнем, относительно которого производится измерения колебаний выходного напряжения фотодиода и, следовательно, измерение величины и направление смещения исследуемой поверхности. Отметим также, что в этом случае максимальная амплитуда колебаний выходного сигнала с фотодиода относительно нулевого уровня u_0 должна соответствовать фазовому сдвигу $\pi/4$, что связано со смещением исследуемой поверхности на величину, равную $\lambda/8$. Эта амплитуда колебаний выходного сигнала с фотодиода, соответствующая смещению $\lambda/8$, определяется следующим выражением:

$$u_{\lambda} = \frac{\lambda}{8} = \frac{u_{\max} - u_{\min}}{2}. \quad (8)$$

Таким образом, уравнение (6) можно переписать в следующем виде:

$$u(t) = u_0 + u_{\lambda} \cos \left\{ \frac{\pi}{2} - \varphi(t) \right\}. \quad (9)$$

Проведем анализ уравнения (9) в зависимости от величины амплитуды смещений исследуемой поверхности. Возможны два случая: - амплитуда колебаний меньше или равна $\lambda/8$ и амплитуда колебаний больше чем $\lambda/8$.

a) Амплитуда колебаний исследуемой поверхности меньше или равна $\lambda/8$.

В этом случае выходной сигнал с фотодиода полностью повторяет форму и амплитуду колебаний этой поверхности. Величина и направление смещения тогда определяются относительно нулевого уровня u_0 .

b) Амплитуда колебаний больше $\lambda/8$.

В этом случае выходной сигнал с фотодиода, наблюдаемый на экране монитора, не будет соответствовать по форме колебаниям исследуемой поверхности. Кривая $u(t)$, описывающая выходной сигнал, будет представлена в виде пакетов с различной частотой и количеством колебаний в них, а также будет иметь дополнительные локальные экстремумы около максимальных u_{\max} и минимальных u_{\min} значений выходного напряжения. Количество колебаний в пакете зависит от величины амплитуды смещения исследуемой поверхности, а частота зависит от скорости смещения поверхности. Каждое полное отклонение выходного сигнала в пакете от нулевого

уровня u_0 соответствует смещению $\lambda/8$. Величина локальных экстремумов, отсчитываемая или от нулевого уровня u_0 , или от максимального u_{\max} , или от минимального u_{\min} значений выходного напряжения, определяет величину смещения пропорциональную $\lambda/8$. Временные точки изменения частоты между пакетами соответствуют моментам времени, в которых направление смещения поверхности меняет знак, то есть амплитуда колебаний достигает экстремального значения.

Проведем теоретический анализ выражения (9). Для упрощения будем полагать, что смещение поверхности происходит в соответствии с выражением:

$$s(t) = a_0(t) \sin(\omega t), \quad (10)$$

где $a_0(t)$ – амплитуда вибрации исследуемой поверхности, ω – циклическая частота вибраций.

На рис. 1 представлены теоретические и экспериментальные результаты, описывающие поведение выходного сигнала $u(t)$ с фотодиода (сплошная кривая) в зависимости от колебаний поверхности (пунктирная кривая) для рассмотренных двух случаев: **а)** амплитуда колебаний исследуемой поверхности равна $\lambda/8$ (рис. 1а); **б)** амплитуда колебаний больше $\lambda/8$, причем амплитуда линейно увеличивается со временем (рис. 1б).

На рис. 1в представлена осциллограмма выходного сигнала с интерферометра, зафиксированная с помощью высокоскоростного осциллографа, которая подтверждает предложенный алгоритм обработки сигнала.

Результаты и выводы

Разработанные лазерный оптоэлектронный интерферометр и метод обработки сигнала были использованы для анализа волновых процессов в пластине, подвергнутой ударным нагрузкам. На рис. 1в хорошо заметно некоторое уменьшение амплитуды сигнала при повышении его частоты. Это связано, по-видимому, с характеристиками осциллографа. Так, входная емкость прибора составляет 25 пФ, входное сопротивление порядка 10 МОм. Следовательно, при возрастании частоты сигнала уменьшается реактивное сопротивление, создаваемое входной емкостью, и, соответственно, уменьшается амплитуда сигнала, фиксируемая на экране осциллографа.

Разработанный интерферометр Майкельсона имеет следующие параметры:

- диапазон частот регистрируемых интерферометром от 0 Гц до 100 МГц;
- чувствительность и точность измерения амплитуды вибраций порядка 5 нм.

Благодарность

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 08-01-99023-р-офи.

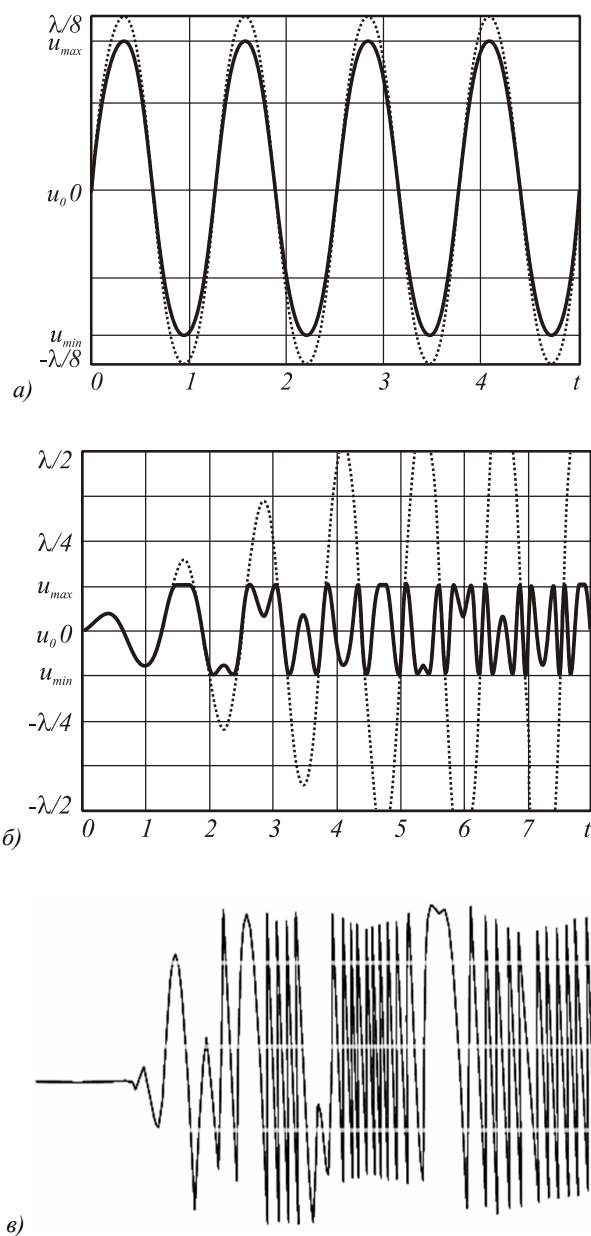


Рис. 1. Теоретические и экспериментальные результаты поведения выходного сигнала $u(t)$ и амплитуды колебаний исследуемой поверхности

Литература

1. Ueda, K. Dynamic characteristics of impact hammers measured by using laser interferometry / K. Ueda and A. Umeda // Proc. X Int. Cong. on Exp. Mech., 1994. - Pp. 619-623.
2. Valle, V. A optical method for dynamic strain measurements. / V. Valle, N. Cottron, A. Lagarde // Proc. X Int. Cong. on Exp. Mech., 1994. - Pp. 549-553.
3. Tyrer, J.R. Application of ESPI to three-dimensional vibration measurements / J. R. Tyrer, M.C. Shellabear // J. of Optics and Laser in Eng, 1991. - Vol. 15. - Pp. 43-56.