

## ПОВЕДЕНИЕ ВЫХОДНОГО СИГНАЛА В СИСТЕМЕ ИЗМЕРЕНИЯ НА ОСНОВЕ ОПТОЭЛЕКТРОННОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА МАЙКЕЛЬСОНА

М.Н. Осипов, М.А. Попов, Т.А. Попова

В статье рассматривается поведение выходного сигнала регистрируемого фотодетектором лазерного оптоэлектронного интерферометра Майкельсона со сферическими волновыми фронтами. Данный анализ позволяет выбрать оптимальный алгоритм расшифровки динамически изменяющейся интерференционной картины в рассматриваемом интерферометре Майкельсона.

**Ключевые слова:** оптические измерения, интерферометрия, интерферометр Майкельсона, цифровая обработка сигнала, вибрация.

### Введение

Современное развитие техники неизбежно ставит задачу повышения надежности любых создаваемых и уже работающих систем. Важнейшей составляющей надежности является соответствие прочности и вибростойкости материалов конструкций предъявляемым требованиям эксплуатации. Для обеспечения требуемых параметров конструкции необходимы экспериментальные исследования при динамических и статических нагрузках. Это требует разработки измерительных средств, позволяющих получать как качественные, так и количественные данные при этих нагрузках.

Оптические бесконтактные методы исследований в настоящее время приобретают все большую научную и прикладную значимость. Значительный интерес вызывает применение неразрушающих интерферометрических методов для исследования динамических процессов, происходящих в элементах конструкций. 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 рассматриваются особенности образования и поведения выходного сигнала в оптоэлектронном лазерном интерферометре со сферическими волновыми фронтами на основе интерферометра Майкельсона при измерении динамических смещений с целью разработки алгоритмов автоматизации процесса обработки выходного сигнала.

### Теоретическое обоснование

Для измерения динамических смещений рассмотрим оптоэлектронный лазерный интерферометр Майкельсона со сферическими волновыми фронтами, оптическая схема которого представлена на рисунке 1.

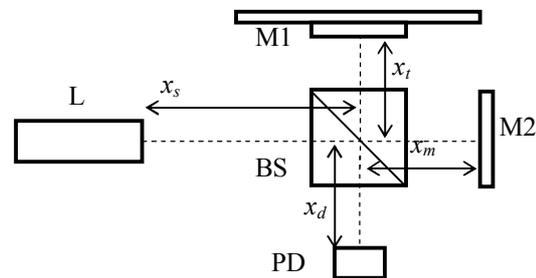


Рисунок 1 – Оптическая схема установки

Образование сферических волновых фронтов достигается тем, что опорное зеркало  $M1$  и исследуемая поверхность  $M2$  находятся в фокусе линзы установленной на входе интерферометра Майкельсона. Интерференционная картина, наблюдаемая в такой оптической схеме, состоит из концентрических интерференционных полос. Следует отметить, что чем более близка сферичность интерферирующих волн в плечах интерферометра, тем более широкие образуются интерференционные кольца, что упрощает юстировку интерферометра при выборе расположения регистрирующего «точечного» фотодетектора  $PD$ .

Опорное зеркало  $M1$  интерферометра имеет возможность перемещения вдоль оптического пути опорного луча, что позволяет вводить необходимый начальный фазовый сдвиг при образовании интерференционной картины полос.

Рассмотрим образование интерференционной картины в представленном интерферометре Майкельсона [1]. Интерференционная картина в интерферометре возникает за счет относительной разности фаз возникающей между двумя пучками лазерного излучения, имеющими различные оптические пути. Для регистрации динамического изме-

ПОВЕДЕНИЕ ВЫХОДНОГО СИГНАЛА В СИСТЕМЕ ИЗМЕРЕНИЯ НА ОСНОВЕ ОПТОЭЛЕКТРОННОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА МАЙКЕЛЬСОНА

нения интерференционной картины применим «точечный» фотодетектор  $PD$ , который расположим вдоль оптической оси интерферометра. Тогда оптические пути для плеч интерферометра можно записать в следующем виде:

$$x_1 = x_3 + 2x_m + x_d, \quad (1)$$

$$x_2 = x_3 + 2x_l + x_d. \quad (2)$$

Используя комплексную форму записи для электрической напряженности электромагнитного поля, запишем значения электрической напряженности на фотодетекторе  $PD$  для волн прошедших плечи интерферометра в следующем виде:

$$\vec{E}_1 = \vec{E}_0 e^{i(kx_1 - \omega t + \varphi)}, \quad (3)$$

$$\vec{E}_2 = \vec{E}_0 e^{i(kx_2 - \omega t + \varphi)}, \quad (4)$$

где  $\vec{E}_0$  - амплитуда электрической напряженности электромагнитного поля (предполагается, что она одинакова в обоих плечах интерферометра),

$k = 2\pi / \lambda$  – волновое число,

$\lambda$  – длина волны лазерного излучения,

$\omega$  – круговая частота лазерного излучения,

$\varphi$  – начальная фаза, которая также считается одинаковой для обоих плеч интерферометра.

Тогда, используя соотношения 1-4, для суммарной электрической напряженности электромагнитного поля на фотодетекторе  $PD$  получим следующее соотношение:

$$\vec{E}_d = \vec{E}_0 \left[ e^{i(kx_3 + 2kx_m + kx_d - \omega t + \varphi)} + e^{i(kx_3 + 2kx_l + kx_d - \omega t + \varphi)} \right] \quad (5)$$

Представим расстояния  $x_m(t)$  и  $x_l(t)$  как величины, состоящие из постоянной и переменной составляющих:

$$x_m(t) = x_{m0} + \delta_m(t), \quad (6)$$

$$x_l(t) = x_{l0} + \delta_l(t). \quad (7)$$

Соотношения (6), (7) записаны в предположении, что исследуемые смещения происходят вдоль оптической оси интерферометра.

Так как фотодетектор фиксирует интенсивность, то распределение в интерференционной картине, с учетом выражений (5..7), запишется в следующем виде:

$$\begin{aligned} I(x, t) &\approx |E_d|^2 = \vec{E}_d * \vec{E}_d = \\ &= E_0^2 \{1 + \cos[2k(x_{l0} - x_{m0} + \delta_l(t) - \delta_m(t))]\} = \\ &= 2E_0^2 \{1 + \cos[\varphi(0) - \varphi(t)]\}, \quad (8) \end{aligned}$$

где  $\varphi(0) = 2k(x_{l0} - x_{m0} + \delta_l(t))$  - начальное значение разности фаз, которая является параметром интерферометра и может изменяться и контролироваться в процессе настройки интерферометра за счет перемещения пьезоэлементом опорного зеркала  $M1$ ,  $\varphi(t) = 2k\delta_m(t)$  - изменение фазы связанное с изменением оптического пути в объектной плече интерферометра вследствие движения исследуемой поверхности  $M2$ .

Из анализа уравнения (8) следует, что величину смещения исследуемой поверхности можно определить следующим выражением:

$$\delta_m(t) = \frac{\lambda}{2} [N(t) + \Delta(t)] \quad (9)$$

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.

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 требует применения различных алгоритмов, которые будут зависеть от значения начальной разности фаз, а также от направления смещения.

#### Алгоритм обработки сигнала

Проанализируем процесс формирования выходного сигнала на фотодиоде с целью выбора эффективного алгоритма его обработки. Изменение интенсивности интерференционной картины на входе фотодиода  $PD$ , описываемое уравнением (8), преобразуется в изменение выходного напряжения фотодиода, что можно записать следующим образом:

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

где  $u(t)$  - выходное напряжение электрической схемы фотодиода,  $k$  - коэффициент преобразования оптоэлектронной схемы интерферометра,  $A$  - постоянная составляющая напряжения смещения на выходе электрической схемы, которое связана с усредненным значением изменения интенсивности интерференционной картины полос,  $B$  - амплитуда полезного выходного напряжения, которая определяется оптической схемой интерферометра.

Из уравнения (6) следует, что изменение интенсивности интерференционной картины в данной точке пространства (за счет смеще-

## РАЗДЕЛ I. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ СИНТЕЗА И АНАЛИЗА ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

ния исследуемой поверхности  $M_2$ ) приводит к циклическому изменению, выходного напряжения с фотодиода от значения  $U_{\max}$  до  $U_{\min}$ .

Из анализа уравнения (10) следует, что для того чтобы система имела максимальную чувствительность необходимо чтобы производная данного выражения была максимальной при нулевом значении  $\varphi(t)$ , то есть при неподвижном положении исследуемой поверхности  $M_2$ . Данное требование выполняется, как видно из уравнения (10), при значении  $\varphi(0) = \pi/2(2n+1)$ . Такое значение  $\varphi(0)$  обеспечивается смещением на соответствующую величину  $\delta_i(t)$  опорного зеркала  $M_1$  с помощью пьезоэлемента. Отметим также, что при таком значении  $\varphi(0)$  система находится на линейном и симметричном участке выражения (10) относительно значений  $U_{\max}$  и  $U_{\min}$ . Следовательно, при таком выборе  $\varphi(0)$  алгоритм расшифровки выходного сигнала фотодиода  $PD$  является оптимальным и не зависит от знака смещения. «Точечный» фотодиод  $PD$  при этих условиях располагается точно посередине между максимумом и минимумом в регистрируемом распределении интенсивности интерференционной картины. Данные условия позволяют определить постоянную составляющую выходного напряжения  $A$  на фотодетекторе следующим образом:

$$A = u_0 = \frac{u_{\max} + u_{\min}}{2}, \quad (11)$$

а амплитуда колебаний  $B$  относительно нулевого уровня  $u_0$ , исходя из оптической схемы интерферометра Майкельсона, должна соответствовать фазовому сдвигу  $\pi/4$ , что связано со смещением  $\delta_i(t)$  зеркала  $M_1$  или смещением  $\delta_m(t)$  исследуемой поверхности  $M_2$  на величину  $\lambda/8$ , определяется следующим образом:

$$B = u_\lambda = \frac{u_{\max} - u_{\min}}{2} \approx \frac{\lambda}{8}. \quad (12)$$

Тогда выражение (10) можно переписать в следующем виде:

$$u(t) = u_0 + u_\lambda \cos\left[\frac{\pi}{2} - \varphi(t)\right]. \quad (13)$$

Детальный анализ выражения (13) показывает, что характерной особенностью выходного сигнала фотодетектора является его форма, которая зависит от вида перемещения исследуемой поверхности. При переме-

щениях постоянного направления - не знакопеременных - для определения величины перемещений достаточно определить количество интерференционных порядков зафиксированных фотодиодом и произвести вычисления согласно выражению (9). При знакопеременных перемещениях характер выходного сигнала фотодетектора имеет особенности.

Рассмотрим колебательный процесс. При амплитудах колебаний исследуемой поверхности  $\delta_m(t) \leq \lambda/8$  выходной сигнал фотодетектора повторяет форму колебания поверхности, а при амплитудах  $\delta_m(t) > \lambda/8$  наблюдаются характерные искажения, и выходной сигнал с фотодиода не соответствует по форме колебаниям исследуемой поверхности. На рисунке 2 представлены теоретически рассчитанные графики колебания исследуемой поверхности (а) и поведение выходного сигнала фотодетектора (б). Как видно из графиков, представленных на рисунке 2, выходной сигнал на начальном этапе, пока амплитуда колебаний поверхности не превысила величину  $\lambda/8$ , повторяет форму колебания поверхности. После того как амплитуда колебаний поверхности превысила величину  $\lambda/8$ , сигнал имеет вид пакетов с различной частотой и количеством колебаний в них, а также возникают дополнительные локальные экстремумы в точках смены направления колебаний. 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  $\lambda/8$ , и соответствует дробной части порядка интерференционной полосы (9). Временные точки изменения частоты между пакетами соответствуют моментам времени, в которых направление смещения поверхности меняет знак, то есть амплитуда колебаний достигает экстремального значения. На рисунке 3 (а,б) показаны осциллограммы выходного сигнала фотодетектора и колебания исследуемой поверхности, которые получены экспериментально. Нижние кривые на каждой осциллограмме соответствуют колебаниям исследуемой поверхности (а):  $\delta_m(t) \leq \lambda/8$ , (б):  $\delta_m(t) > \lambda/8$ .

ПОВЕДЕНИЕ ВЫХОДНОГО СИГНАЛА В СИСТЕМЕ ИЗМЕРЕНИЯ НА ОСНОВЕ ОПТОЭЛЕКТРОННОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА МАЙКЕЛЬСОНА

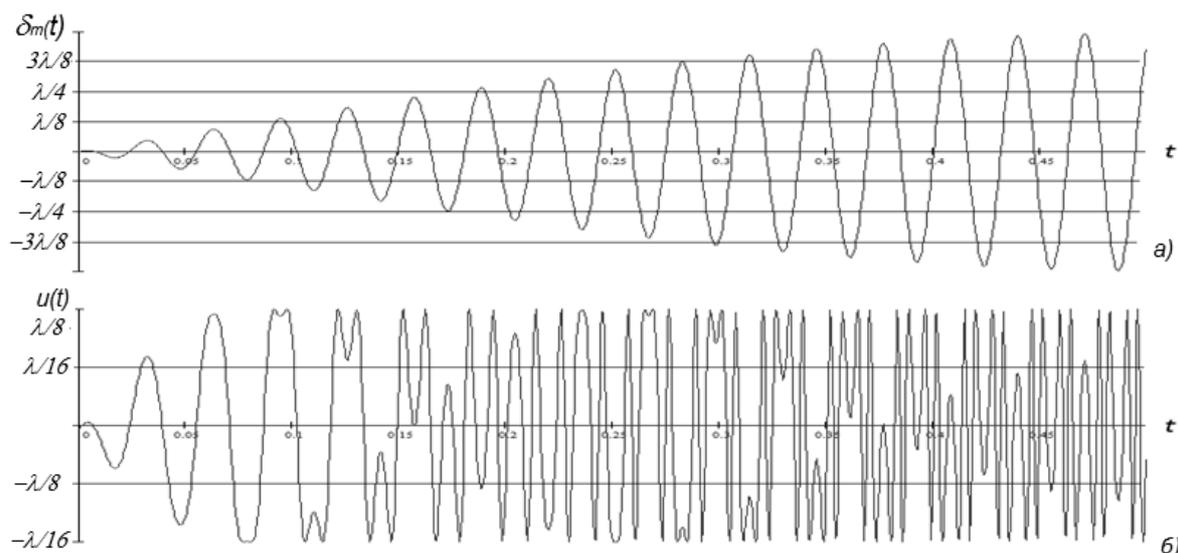


Рисунок 2 - Графики колебания поверхности (а) и выходного сигнала фотодетектора (б).

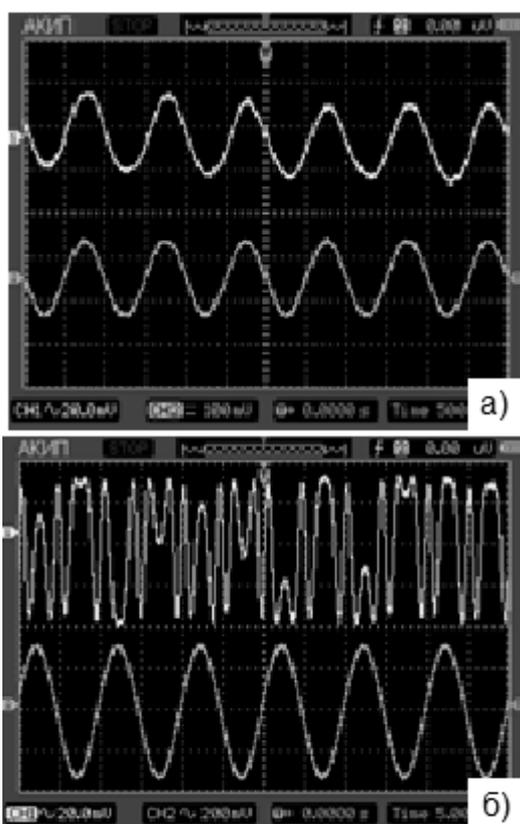


Рисунок 3 - Осциллограммы смещения поверхности и выходного сигнала фотодетектора

Верхние кривые осциллограмм соответствуют выходным сигналам фотодетектора. Как видно из рисунков 2 и 3 теоретические и экспериментальные результаты совпадают.

Необходимо отметить, что из анализа выражения (13) следует, что существуют положение интерференционных полос относительно фотодетектора, при которых, в случае остановки перемещения исследуемой поверхности, нельзя однозначно определить направление последующего смещения. Для решения данной проблемы предлагается использовать второй «точечный» фотодетектор, располагаемый со сдвигом фазы относительно первого фотодетектора на величину  $\pm\pi/2(2n+1)$ , что следует из теоретического анализа выражения (13).

#### Выводы

На основе проведенного анализа получены исходные данные для разработки алгоритма автоматизированной обработки выходного сигнала в оптоэлектронном интерферометре Майкельсона при исследовании динамических смещений различной величины и направления.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Борн, М. Основы оптики. / М. Борн, Э. Вольф. - М.: Издательство «Наука», 1973 – 720 с.

Аспирант **М.А. Попов**, тел. 8-902-336-53-58, [bigdeal2000@yandex.ru](mailto:bigdeal2000@yandex.ru); к. ф.-м. н., доц. **М.Н. Осипов**, тел. 8-927-263-57-77, [osipov@ssu.samara.ru](mailto:osipov@ssu.samara.ru), кафедра безопасности информационных систем Самарского государственного университета; ассистент **Т.А. Попова**, тел. 8-904-709-10-52, [gta23@mail.ru](mailto:gta23@mail.ru), кафедра математики и бизнес-информатики Самарского государственного университета.