

Научная статья

УДК 53.082.54

DOI:10.31854/1813-324X-2024-10-2-57-66



Исследование интермодуляционных составляющих сигналов лазерных виброметров для безошибочного определения параметров колебаний

✉ Елена Валентиновна Кравец¹, kravec.ev@sut.ru

✉ Елена Георгиевна Семенова², kaf_o7@voenmeh.ru

¹Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. М.А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

²Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, Санкт-Петербург, 190005, Российская Федерация

Аннотация: В данной статье приводятся результаты теоретического исследования сигналов лазерных виброметров при нахождении поверхности исследуемого объекта в плоскости, ортогональной распространению лазерного луча. В статье показано, что лазерный виброметр, построенный по схеме Майкельсона, может давать ошибочные результаты при вычислении амплитуды колебаний. Причина возникновения ошибки заключается в фазовом сдвиге между интерферирующими лучами, влияющем на результат определения абсолютной величины смещения поверхности. В статье проведено теоретическое спектральное исследование выходных сигналов различных схем интерферометров. Для виброметра на основе интерферометра Майкельсона предложен алгоритм определения частоты и амплитуды колебаний объекта по осциллограмме интерференционного сигнала для случая, когда амплитуда колебаний значительно превышает длину волны лазера. Показано, что в данном случае результат измерения не зависит от величины рассогласования фаз плеч интерферометра. Проанализирован выходной сигнал гетеродинной схемы интерферометра, при этом независимость спектральных компонент от фаз оптических лучей позволяет избежать ошибок при вычислении амплитуды колебаний. Предложена схема интерферометра Майкельсона с частотным смещением оптического луча, осуществляемого за счет введения в схему оптического модулятора, работающего в режиме дифракции Брэгга.

Ключевые слова: интерферометр, лазерная виброметрия, интерферометр Майкельсона

Ссылка для цитирования: Кравец Е.В., Семенова Е.Г. Исследование интермодуляционных составляющих сигналов лазерных виброметров для безошибочного определения параметров колебаний // Труды учебных заведений связи. 2024. Т. 10. № 2. С. 57–66. DOI:10.31854/1813-324X-2024-10-2-57-66. EDN:YHIRMC

A Research of Intermodulation Components in Laser Vibrometers for Precise Measurement of Oscillations

✉ Elena Kravets¹, kravec.ev@sut.ru

✉ Elena Semenova², kaf_o7@voenmeh.ru

¹The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications, St. Petersburg, 193232, Russian Federation

²Baltic State Technical University «Voenmeh» named after D.F. Ustinov, St. Petersburg, 190005, Russian Federation

Abstract: This paper presents the results of theoretical research of signals of laser vibrometers, with the surface of the object of interest orthogonal to the direction of the beam. The article shows that the Michelson interferometer based vibrometer may yield erroneous results when measuring the amplitude of oscillations. The errors arise due to the phase shift between the interfering beams, which affects the measurement of the absolute value of surface shift. The article presents theoretical analysis of the spectra of the output signals of interferometers of various designs. For the Michelson interferometer based vibrometer, the algorithm for the measurement of frequencies and amplitudes by reading the oscillograms of interference signals suggests that the amplitude be much larger than the laser's wavelength. It is proved that in this case the result does not depend on the mismatch in phases between the beamsplitter and each mirror. The output signal of the heterodyne interferometer has been analyzed. The property of spectral components of being independent of the beams' phases helps eliminate errors when calculating the amplitude. A special design of the Michelson interferometer is proposed, where the beam's frequency is shifted by using the optical modulator that operates in the Bragg diffraction mode.

Keywords: laser-interferometric measurement systems, mechanical oscillations, Michelson interferometer

For citation: Kravets E., Semenova E. A Research of Intermodulation Components in Laser Vibrometers for Precise Measurement of Oscillations. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2024;10(2):57–66. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2024-10-2-57-66. EDN:YHIRMC

Введение

Существует две группы методов измерения амплитуды и частоты перемещения (колебаний) исследуемой поверхности объекта: контактные, подразумевающие механическую связь датчика с исследуемым объектом, и бесконтактные.

Наиболее распространенными являются контактные методы, основанные на использовании пьезоэлектрических датчиков. Однако механическая связь датчика с исследуемым объектом не всегда допустима. Если масса исследуемого объекта, а, следовательно, и его инерционность не велика, то пьезоэлектрический датчик может существенно влиять на характер колебания, что вносит дополнительную ошибку в измерения [1–6].

Поэтому последние годы основное внимание уделяется разработке бесконтактных методов измерения параметров колебаний. Их общим достоинством является отсутствие воздействия на исследуемый объект и пренебрежительно малая инерционность.

В настоящее время в связи с развитием полупроводниковой лазерной техники и оптических методов когерентной обработки сигналов большое распространение получили методы, основанные на зондировании объекта оптическими волнами. Применение лазера в качестве источника излучения позволяет производить измерения колебаний амплитудой до долей ангстрем ($0,01 \text{ \AA}$) [4–6]. В плоскости фотоприемника наблюдается интерференция опорного и сигнального пучков, что приводит к модуляции его выходного тока:

$$s(t) = \cos(m \cdot \sin(\Omega t + \varphi_0) + \varphi), \quad (1)$$

где z_1 и z_2 – оптический ход опорного и сигнального пучков; A – амплитуда колебаний поверхности; Ω – частота колебаний поверхности исследуемого

объекта; φ_0 – начальная фаза колебания исследуемого объекта; m – индекс фазовой модуляции; φ – разность фаз, зависящая от разности оптического хода:

$$m = 2A \cdot \frac{\omega}{c}, \quad \varphi = \frac{\omega}{c} \cdot (z_1 - z_2). \quad (2)$$

Одной из основных оптических схем для определения параметров колебаний является схема на основе интерферометра Майкельсона, приведенная на рисунке 1 [4, 7–9], где 1 – неподвижное опорное зеркало; 2 – лазер; 3 – светоделительное зеркало; 4 – объект контроля; 5 – фотоприемник; 6 – блок обработки.

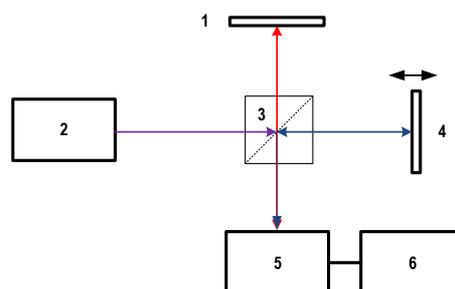


Рис. 1. Оптическая схема интерферометра Майкельсона

Fig. 1. A Michelson Interferometer Based Optical Control Configuration

Сигнал с фотоприемника поступает на блок обработки для демодуляции и определения параметров вибрации. Спектр выходного сигнала при гармоническом законе колебания исследуемого объекта, находящегося в ортогональной плоскости к лучу лазера, с точностью до амплитудного множителя можно записать в выражение (3), где $J_j(x)$ – функция Бесселя j -го порядка 1 рода. При малом индексе фазовой модуляции $m \ll 1$ можно не учитывать высшие составляющие разложения, оставляя только одну в каждой сумме гармоник [10]. С учетом аппроксимации выражение (3) преобразуется к (4).

$$S(t) = J_0(m) \cdot \cos\varphi - \sum_{l=1}^{\infty} 2J_{2l-1}(m) \cdot \sin\varphi \cdot \sin((2l-1) \cdot (\Omega t + \varphi_0)) + \sum_{k=1}^{\infty} 2J_{2k}(m) \cdot \cos\varphi \cdot \cos(2k(\Omega t + \varphi_0)), \tag{3}$$

$$S(t) \approx (1 + \frac{m^2}{4}) \cdot \cos\varphi - m \cdot (1 - \frac{m^2}{8}) \cdot \sin\varphi \cdot \sin(\Omega t + \varphi_0) + m^2 \cdot (1 - \frac{m^2}{12}) \cdot \cos\varphi \cdot \cos(2\Omega t + \varphi_0). \tag{4}$$

Величина начальной фазы колебаний объекта φ_0 не влияет на амплитуду составляющих (4), и в дальнейшем можно полагать $\varphi_0 = 0$ без уменьшения общности. В соответствии с (3) и (4) разность фаз интерферирующих пучков φ оказывает существенное влияние на спектр выходного сигнала. В связи с чем могут быть сделаны ошибочные выводы о параметрах колебаний исследуемых поверхностей. Очевидно, что в случае, если обеспечить разность фаз интерферирующих лучей $\varphi = 0$, то в разложении отсутствуют нечетные гармоники, а при $\varphi = \pi/2$ – четные. Поэтому применение оптического интерферометра для измерений параметров колебаний объектов требует постоянной калибровки и обеспечения равенства хода лучей в опорном и сигнальном плече. При применении оптико-интерферометрических виброметров важным является отсутствие в схеме неконтролируемых, случайных фазовых сдвигов лазерного пучка. Таким образом, выравнивание оптических длин плеч интерферометра – необходимое условие, определяющее результат измерения параметров колебаний.

В настоящее время большое внимание уделяется вопросам разработки прецизионных оптических схем перемещений и вибраций. Для повышения точности измерений в работах [11–14] предложены схемные решения, обеспечивающие выравнивание оптического хода лучей за счет использования до-

полнительных средств контроля. Это значительно усложняет процесс проведения измерений, который требует визуального наблюдения интерференционной картины и предварительной калибровки системы. В противном случае результаты определения параметров вибрации при каждом измерении будут зависеть от случайного значения начальной разности фаз.

В ряде работ рассмотрены преимущества использования модулированных сигналов лазерного источника излучения [15, 16]. Однако результатом применения подобных схем является определение разности оптического хода лучей, и для проведения измерений по-прежнему необходимо проводить калибровку схемы интерферометра. Таким образом, задача создания схемы оптического виброметра, позволяющей исключить влияние фазовых ошибок интерферирующих пучков на результаты измерений параметров колебаний, является актуальной.

Анализ сигнала интерферометра Майкельсона при работе с колебаниями большой амплитуды

Рассмотрим случай, когда амплитуда колебаний велика относительно длины волны оптического излучения интерферометра, т. е. когда индекс фазовой модуляции $m \gg 1$ [17]. При этом мгновенная частота сигнала $s(t)$ (1) изменяется по гармоническому закону:

$$\omega(t) = \frac{d}{dt} [m \cdot \sin(\Omega t + \varphi_0) + \varphi] = m \cdot \Omega \cdot \sin(\Omega t + \varphi_0). \tag{5}$$

Мгновенная частота интерференционного сигнала (5) с выхода фотоприемника зависит от произведения оцениваемых параметров амплитуды и частоты $A \cdot \Omega$, что делает применение спектральных методов неперспективным.

Однако анализ временной структуры сигнала позволяет найти искомые параметры при условии, что амплитуда колебаний больше длины волны оптического излучения:

$$A \gg \lambda. \tag{6}$$

При этом обеспечивается условие $m \cdot \Omega \gg \Omega$, что позволяет находить частоту колебаний Ω , фиксируя

максимумы и минимумы мгновенной физической частоты на временной реализации, отстоящие друг от друга на величину:

$$\frac{T}{2} = \frac{\pi}{\Omega}. \tag{7}$$

В данном случае методика определения параметров колебаний основана на непосредственном наблюдении осциллограммы интерференционного сигнала. Процесс формирования сигнала $s(t)$ поясняется диаграммой на рисунке 2.

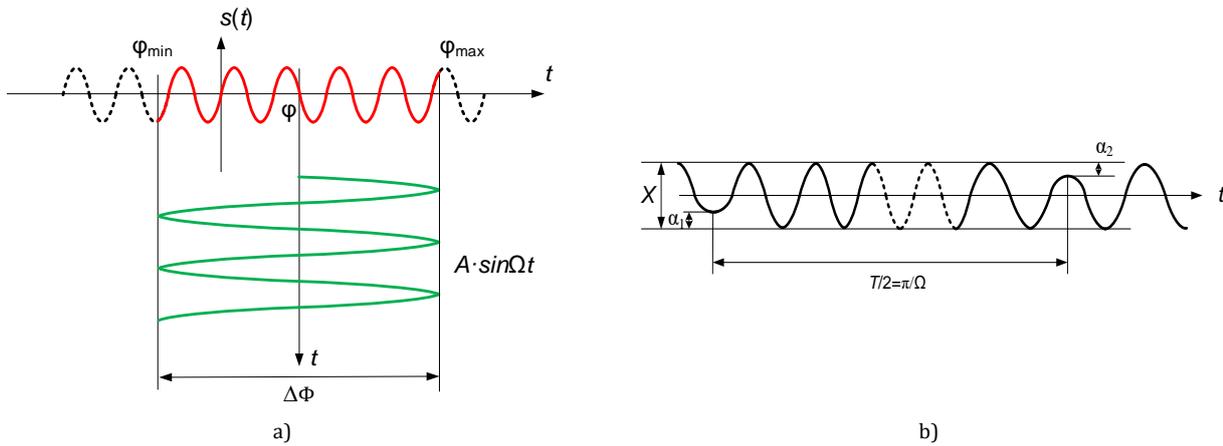


Рис. 2. Диаграмма, поясняющая формирование интерференционного сигнала при большом индексе модуляции $m \gg 1$ (a), и интерференционный сигнал (b)

Fig. 2. Interference Signal Diagram at Large Modulation Index $m \gg 1$ (a) and Interference Signal (b)

При большом индексе однотональной фазовой модуляции, описываемой выражением (2), сигнал (1) представляет собой квазигармоническое колебание с периодической частотой модуляции и возможными амплитудными провалами (см. рисунок 2b). По числу пересечений сигнала через ноль N и по глубине амплитудных провалов α , приходящихся на половину периода колебаний исследуемой поверхности, можно вычислить амплитуду колебаний. Определение частоты колебаний исследуемого объекта Ω основано на измерении временного интервала между точками с минимальной мгновенной частотой, соответствующей величине (7).

Для определения амплитуды колебаний A необходимо определить число точек пересечения нуля на интервале $T/2$, а также величины амплитудных интервалов a_1 и a_2 на краях интервала (см. рисунок 2b).

Как следует из рисунка 2, полное изменение фазы сигнала за время $T/2$ составляет:

$$\Delta\Phi = \frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \cdot A + \varphi - \left(-\frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \cdot A + \varphi \right) = \frac{4 \cdot \pi}{\lambda} \cdot A. \quad (8)$$

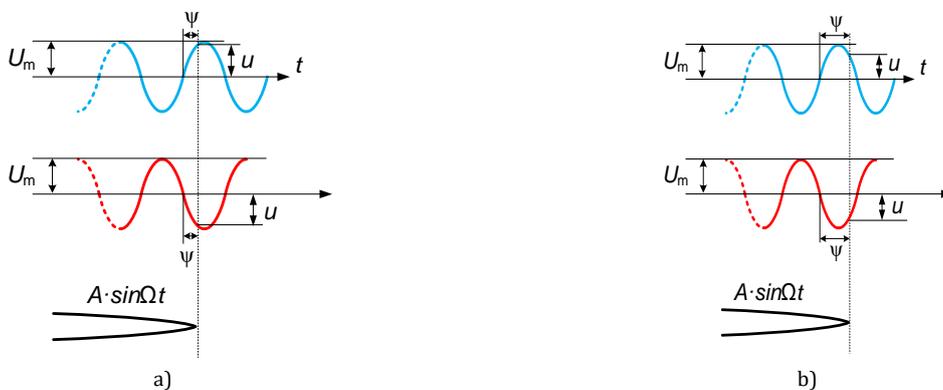


Рис. 3. Возможные соотношения при формировании амплитудных провалов осциллограммы интерференционного сигнала при фазовых набегах $\psi < \pi/2$ (a) и $\psi > \pi/2$ (b)

Fig. 3. Possible Relationships in the Formation of Amplitude Dips in the Oscillogram of the Interference Signal at Phase Overlaps $\psi < \pi/2$ (a) and $\psi > \pi/2$ (b)

Полный фазовый набег может быть представлен в виде выражения:

$$\Delta\Phi = (N - 1) \cdot \pi + \psi_1 + \psi_2. \quad (9)$$

где $\psi_{1,2}$ – фазовые набеги на краях интервала; $\psi_{1,2} < \pi$.

Рассмотрим подробнее возможные ситуации на краях интервала с учетом произвольного $\psi_{1,2}$:

– в ситуации, представленной на рисунке 3a:

$$\psi = \arcsin \frac{|U|}{U_m} = \frac{\pi}{2} - \arccos \frac{|U|}{U_m}, \quad (10)$$

– в ситуации, представленной на рисунке 3b:

$$\psi = \pi - \arcsin \frac{|U|}{U_m} = \frac{\pi}{2} + \arccos \frac{|U|}{U_m}. \quad (11)$$

Чтобы различить эти ситуации, введем в рассмотрение вместо мгновенного значения U величину амплитудного провала α . Ситуация, когда временная структура имеет вид $\alpha = U_m - U$ (см. рисунок 3a), представлена на рисунке 4; при $\alpha = U_m + U$ (см. рисунок 3b) – на рисунке 5.

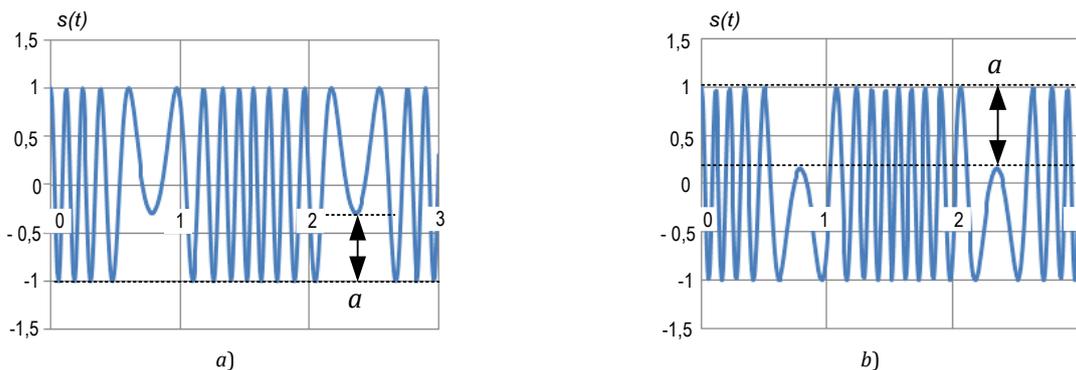


Рис. 4. Вид амплитудных провалов интерференционного сигнала при $a = U_m - U$, если: а) $U < 0$; б) $U > 0$

Fig. 4. Type of Amplitude Dips of The Interference Signal at $a = U_m - U$: а) if $U < 0$; б) if $U > 0$

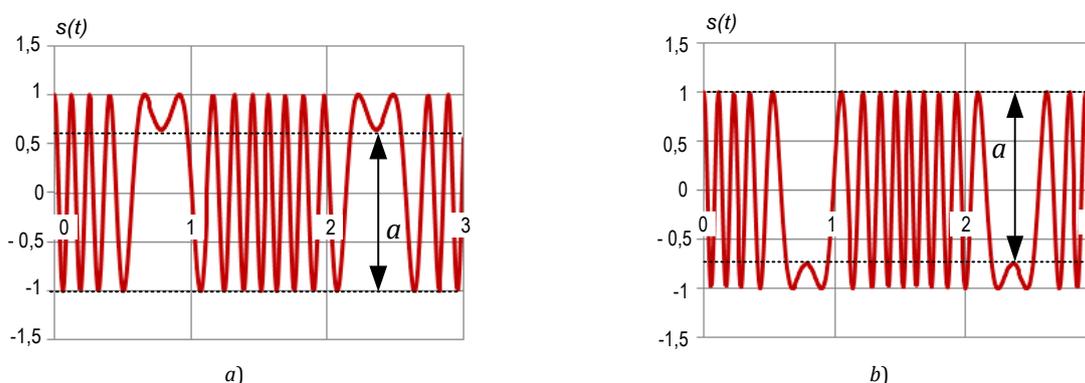


Рис. 5. Вид амплитудных провалов интерференционного сигнала при $a = U_m + U$, если: а) $U < 0$; б) $U > 0$

Fig. 5. Type of Amplitude Dips of the Interference Signal at $a = U_m + U$: а) if $U < 0$; б) if $U > 0$

Используя критерий различия при формировании амплитудных провалов для ситуации, представленной на рисунке 3а, $\text{sign}(a - U_m) = -U$, а для ситуации на рисунке 3б – $\text{sign}(a - U_m) = U$.

При нахождении общего выражения для величины фазового набега на краю интервала ψ следует использовать частные результаты, различающиеся знаком слагаемых.

Кроме того, удобно ввести размах $X = 2U_m$. С учетом введенных обозначений:

$$\psi = \frac{\pi}{2} + \text{sign}(2a - X) \cdot \arccos \frac{|2a - X|}{X}. \quad (12)$$

С учетом полученных значений (10–12) выражение (9) позволяет определить амплитуду колебаний поверхности из выражения (13).

$$A = \frac{\lambda}{4\pi} \cdot \left[(N - 1) + \pi + \text{sign}(2a_1 - X) \cdot \arccos \frac{|2a_1 - X|}{X} + \text{sign}(2a_2 - X) \cdot \arccos \frac{|2a_2 - X|}{X} \right]. \quad (13)$$

При разработке лазерно-интерферометрических схем определения параметров колебаний важным вопросом является выбор метода обработки оптических и электрических сигналов, который позволяет восстановить истинную временную зависимость фазы сигнальной световой волны.

Таким образом, интерферометр Майкельсона (см. рисунок 1) позволяет проводить однозначные измерения параметров вибрации, амплитуда которых отвечает условию $A \gg \lambda$. При этом схема не требует выравнивания оптической длины плеч, а результат измерений не зависит от случайного со-

отношения фаз интерферирующих оптических лучей. Но ограничение (6), накладываемое в этом случае, не позволяет считать предложенную методику счета полос универсальной, а схему – применимой к решению широкого круга задач.

Следует учесть, что при малом индексе фазовой модуляции m временная структура сигнала сильно зависит от разности фаз интерферирующих лучей φ , и рассмотренный способ определения частоты Ω и амплитуды A колебаний становятся здесь неприменимым.

Анализ сигнала интерферометра с модуляцией сигнала в опорном плече

В ряде работ [4, 18] предложена методика измерения амплитуд колебаний с использованием интерферометра Майкельсона с модуляцией частоты излучения в опорном плече. Модуляция сигнала опорного луча обеспечивается за счет гармонических колебаний опорного зеркала (см. рисунок 1) с частотой ω_1 , при этом частота колебания опорного зеркала отвечает условию $\omega_1 \ll \Omega$.

Можно предположить, что отфильтрованный во круг частоты колебаний исследуемого объекта Ω сигнал будет иметь вид (14). При этом детектирование амплитудно-модулированного сигнала позволит вычислить амплитуду и частоту колебаний объекта.

Для проверки гипотезы (14) необходимо провести разложение интермодуляционной составляющей сигнала на выходе фотоприемника в ряд Фурье. Сигнал на выходе фотоприемника оптической схемы с колебанием опорного зеркала определяется выражением (15), где C – амплитуда колебаний опорного зеркала; ω_1 – частота колебаний опорного зеркала, при этом $\omega_1 \ll \Omega$; $m_{1,2}$ – индексы фазовой модуляции для опорного зеркала и объекта контроля; φ_1 – начальная фаза колебаний опорного зеркала;

$$m_1 = 2 \cdot \frac{\omega}{c} \cdot A, \quad m_2 = 2 \cdot \frac{\omega}{c} \cdot C,$$

$$\Delta\varphi = \varphi_1 - \frac{\varphi_0}{\Omega} \cdot \omega_1 + \pi, \quad \varphi = \frac{\omega}{c} \cdot (z_2 - z_1).$$

$$i_1(t) \sim J_1(m_1) \cdot \sin(\omega_1 t + \varphi) \cdot \sin(\Omega t). \tag{14}$$

$$s(t) = \cos\left(\frac{\omega}{c} \cdot A \cdot \sin(\Omega t + \varphi_0) - \frac{\omega}{c} \cdot C \cdot \sin(\omega_1 t + \varphi_1) + \frac{\omega}{c} \cdot (z_2 - z_1)\right). \tag{15}$$

Результаты спектрального разложения для выражения (15) представлены в таблице 1

ТАБЛИЦА 1. Амплитуды спектральных составляющих сигнала интерферометра с колеблющимся опорным зеркалом

TABLE 1. Amplitudes of the Spectral Components of the Interferometer Signal with an Oscillating Reference Mirror

Частота	Амплитуда гармоники
0	$J_0(m_1)J_0(m_2)$
Ω	$-2J_0(m_2)J_1(m_1)\sin\varphi$
$\Omega - \omega_1$	$-2J_1(m_1)J_1(m_2)\cos\varphi$
$\Omega + \omega_1$	$2J_1(m_1)J_1(m_2)\cos\varphi$
$\Omega - 2\omega_1$	$-2J_1(m_1)J_2(m_2)\sin\varphi$
$\Omega + 2\omega_1$	$-2J_1(m_1)J_2(m_2)\sin\varphi$
$\Omega - 3\omega_1$	$-2J_1(m_1)J_3(m_2)\cos\varphi$
$\Omega + 3\omega_1$	$2J_1(m_1)J_3(m_2)\cos\varphi$
2Ω	$2J_0(m_2)J_2(m_1)\cos\varphi$
$2\Omega - \omega_1$	$2J_2(m_1)J_1(m_2)\sin\varphi$
$2\Omega + \omega_1$	$-2J_2(m_1)J_1(m_2)\sin\varphi$
$2\Omega - 2\omega_1$	$2J_2(m_1)J_2(m_2)\cos\varphi$
$2\Omega + 2\omega_1$	$2J_1(m_1)J_2(m_2)\cos\varphi$
$2\Omega - 3\omega_1$	$2J_2(m_1)J_3(m_2)\sin\varphi$
$2\Omega + 3\omega_1$	$-2J_2(m_1)J_3(m_2)\sin\varphi$
...	...

Анализ спектральных компонентов сигнала, представленный в таблице 1, позволяет сделать следующие выводы:

– амплитуды составляющих симметричны относительно Ω по оси частот, четные гармоники $\Omega \pm 2l \cdot \omega_1$ синфазны, но нечетные $\Omega \pm (2l - 1) \cdot \omega_1$ про-

тивопазы; следовательно, в отфильтрованном сигнале имеет место фазовая модуляция, что не отвечает гипотезе, описываемой выражением (13);

– спектральные составляющие сильно зависят от фаз интерферирующих пучков φ .

Таким образом, схема требует выравнивания оптического хода лучей и обладает тем же недостатком, что и предыдущая.

Анализ выходного сигнала гетеродинной схемы интерферометра

Рассмотрим возможности гетеродинной схемы интерферометра для определения параметров вибрации [19–24]. Основным отличием является смещение частоты излучения опорного или предметного луча относительно другого на величину ω_0 .

Интермодуляционная составляющая сигнала, получаемого на фотоприемнике, с точностью до амплитудного множителя может быть представлена в виде:

$$s(t) = \cos(\omega_0 \cdot t + m \cdot \sin(\Omega t + \varphi_0) + \varphi). \tag{16}$$

Спектральный состав выходного сигнала гетеродинной схемы интерферометра (16) представим выражением (17). Анализ выражения (17) показывает, что начальная разность фаз пучков φ не влияет на амплитудные составляющие спектра сигнала. Это принципиально отличает гетеродинную схему от рассмотренных ранее. Проведенный анализ позволяет сделать вывод, что, по сравнению с схемой интерферометра (см. рисунок 1), гетеродинная схема является наиболее перспективной вследствие отсутствия влияния разности фаз пучков на результаты при исследовании вибраций объектов.

$$\begin{aligned}
 S(t) = & J_0(m) \cdot \cos(\omega_0 t + \varphi) + \sum_{k=1}^{\infty} 2J_{2k}(m) \cdot \cos((\omega_0 - 2k\Omega) \cdot t + \varphi) + \\
 & + \sum_{k=1}^{\infty} 2J_{2k}(m) \cdot \cos((\omega_0 - 2k\Omega) \cdot t + \varphi) + \sum_{l=1}^{\infty} 2J_{2l-1}(m) \cdot \cos((\omega_0 + (2l-1) \cdot \Omega) \cdot t + \varphi) - \\
 & - \sum_{l=1}^{\infty} 2J_{2l-1}(m) \cdot \cos((\omega_0 - (2l-1) \cdot \Omega) \cdot t + \varphi).
 \end{aligned}
 \tag{17}$$

Гетеродинная схема интерферометра с акустооптическим модулятором

Для реализации гетеродинной схемы интерферометра необходимо осуществить частотный сдвиг оптического луча в одном из плеч. Для этого можно использовать свойства акустооптического модулятора (АОМ) света, работающего в режиме дифракции Брэгга (рисунок 6) [25], где 1 – неподвижное опорное зеркало; 2 – генератор; 3 – акустооптический модулятор; 4 – лазер; 5 – полупрозрачное зеркало; 6 – объект контроля; 7 – фотоприемник; 8 – блок обработки (анализатор спектра).

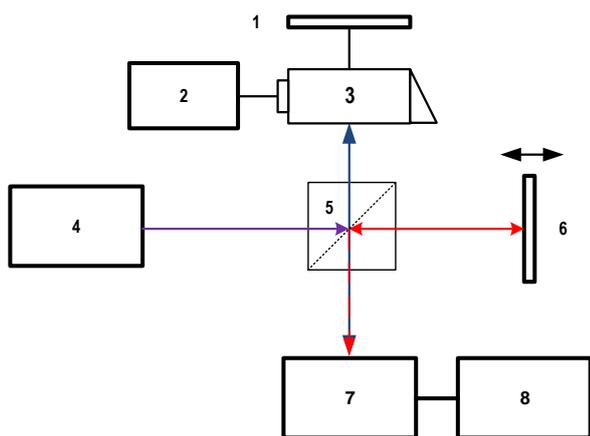


Рис. 6. Схема интерферометра Майкельсона с акустооптическим модулятором

Fig. 6. A Michelson Interferometer Based Optical Control Configuration with Using Reflected Beam

Максимум интенсивности света в дифракционном порядке имеет место при выполнении условия Брэгга [25]:

$$\sin\theta_B = \frac{K}{2 \cdot k} = \frac{\lambda}{2\Lambda}, \tag{18}$$

где θ_B – угол между направлением нормали к ультразвуковому столбу и направлением падающего света; λ – длина световой волны в модуляторе; K – волновое число акустической волны; k – волновое число оптической волны внутри среды взаимодействия.

Условие дифракции Брэгга (18) позволяет изменить схему интерферометра Майкельсона, как по-

казано на рисунке 7, где 1 – лазер; 2 – акустооптический модулятор; 3 – фотоприемник; 4 – объект контроля; 5 – блок обработки (анализатор спектра); 6 – генератор.

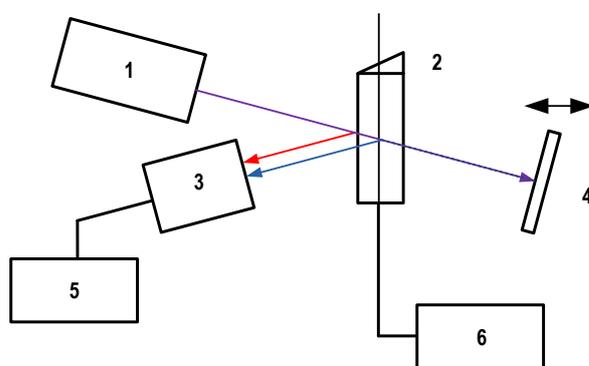


Рис. 7. Схема интерферометра с акустооптическим модулятором

Fig. 7. A Michelson Interferometer Based Optical Control Configuration with Using Reflected Beam

Опорный луч может быть сформирован за счет частичного отражения луча лазера при его падении под углом Брэгга θ_B на поверхность акустооптического модулятора. Это позволит избавиться от опорного зеркала и, как следствие, упростить схему. Оставшийся световой поток проходит через акустооптический модулятор и в нулевом дифракционном порядке падает на объект контроля, формируя при отражении сигнальный луч.

При вторичном прохождении через модулятор сигнальный луч дифрагирует на акустической волне и попадает на фотоприемник коллинеарно с опорным пучком (см. рисунок 7). В плоскости фотоприемника формируется динамическая интерференционная картина. Амплитуду первой гармоники сигнала с выхода фотоприемника можно выразить выражением (19) [10]. Обычно для обработки фазомодулированных сигналов применяют фазовое детектирование.

Однако если индекс фазовой модуляции $m < 1$, то в спектре выходного сигнала гетеродинного интерферометра (17) почти отсутствуют гармоники высоких порядков, и полезный сигнал можно считать монохроматическим (19).

$$A_1 = J_1(m) = \frac{m}{2} \cdot \left(1 - \frac{m^2}{8} + \frac{m^4}{192} - \dots \right) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k \cdot \left(\frac{m}{2}\right)^{1+2k}}{k! \cdot (n+k)!} \quad (19)$$

$$\frac{J_1(m)}{J_0(m)} \approx \frac{m}{2} \cdot \left(1 + \frac{m^2}{8} - \frac{5 \cdot m^4}{192} + \dots \right) \quad (20)$$

Для определения индекса фазовой модуляции предлагается избавиться от влияния интенсивности опорного и сигнального пучков, путем определения отношения амплитуд несущей и первой гармоники спектра сигнала по формуле (20) [10]. Амплитуда колебаний исследуемого объекта, с учетом физического смысла индекса фазовой модуляции (2) при условии $m < 1$, однозначно определяется выражением:

$$A = \frac{J_1(m)}{J_0(m)} \cdot \frac{\lambda}{2\pi} \quad (21)$$

Для вычисления амплитуды колебаний предлагается использовать анализатор спектра с узкополосным перестраиваемым фильтром для выделения амплитуды несущей и первой гармоники спектра сигнала с последующим вычислением их отношения (21).

Заключение

В ходе проведенного исследования установлено, что важным вопросом применения оптико-интерферометрических схем определения параметров колебаний является условие отсутствия неконтролируемых и случайных фазовых сдвигов лазерного пучка.

Проведенный анализ выходных сигналов интерферометров с неподвижным и колеблющимся опорным зеркалом показывает наличие сильной зависимости от начальной разности фаз оптических пучков. Это делает применение данных схем для задач измерения параметров колебаний малой амплитуды неперспективным, так как они требуют точной юстировки, выравнивания оптического хода лучей, в противном случае это приведет к ошибочному определению амплитуды колебаний исследуемого объекта.

Исследована возможность использования интерферометра Майкельсона для определения колебаний поверхности объектов, амплитуда которых значительно превышает длину волны лазера, т. е. при большом индексе фазовой модуляции выходного сигнала. Показано, что данный метод позволяет однозначно определять параметры колебаний, а полученный результат не зависит от начальной разности фаз лучей. Несмотря на простоту, метод определения параметров колебаний, основанный на анализе временной структуры сигнала интерферометра (см. рисунок 2) является достаточно информативным, особенно при наличии априорной информации о движении объекта.

Предложенная схема интерферометра с гетеродинированием оптического излучения (см. рисунок 7) обладает рядом преимуществ, по сравнению с классической схемой измерения параметров колебаний (см. рисунок 1):

- обеспечивается независимость результата измерений от разности фаз оптических лучей, что позволяет исключить ошибки при определении амплитуды колебания поверхности;
- используются грани АОМ (ячейки Брэгга) для формирования луча, это позволяет упростить схему интерферометра Майкельсона;
- применяются узкополосный фильтр и цифровой анализатор спектра для анализа выходного сигнала, что дает выигрыш в отношении сигнал шум по сравнению с фазовым детектором.

Перспективное направление развития интерферометров для определения параметров колебаний малой амплитуды связано с применением гетеродинных схем. Для обеспечения частотного сдвига в работе предложено использование акустооптической ячейки, работающей в режиме дифракции Брэгга.

Данная схема может являться основой для разработки прецизионного прибора измерения колебаний малой амплитуды, который может найти свое применение, например, в исследовании устройств твердотельной электроники. При изучении напряжений в кварцевом элементе, взаимодействии основного вида колебаний и их гармоник с другими видами колебаний, возбуждаемыми тем же электрическим полем, что и основной вид, возникает задача исследования распределения колебаний по поверхности кварца. Для прецизионных кварцевых резонаторов амплитуды колебаний кварца (на частотах 5–8 МГц) составляет от долей до десятка ангстрем.

Так как для описания сигналов оптико-электронного комплекса интерферометра используется плоская волна, что является, в ряде случаев, допустимым упрощением, представляет интерес в дальнейшем рассмотреть влияние свойств гауссова пучка на выходные характеристики предложенной интерферометрической схемы. Данный подход позволит учесть влияние угловых и линейных ошибок при сведении оптических лучей в плоскости фотоприемника на результат определения параметров колебаний.

Список источников

1. Фрайден Д. Современные датчики. Справочник. М.: Техносфера, 2005. 592 с.
2. Николаенко А.Ю., Львов А.А., Львов П.А., Юрков Н.К. Анализ бесконтактных методов измерения линейных перемещений и вибраций // Труды международного симпозиума "Надежность и качество" (Пенза, Россия, 21–31 мая 2018). Пенза: ПГУ, 2018. Т. 2. С. 88–91. EDN:YAFFNZ
3. Стуленков А.В., Коротин П.И., Суворов А.С. Новые применения лазерной виброметрии // Известия РАН. Серия физическая. 2020. Т. 84. № 6. С. 824–828. DOI:10.31857/S0367676520060290. EDN:JWPUFG
4. Застрогин Ю.Ф. Контроль параметров движения с использованием лазеров. М.: Машиностроение, 1986. 272 с.
5. Пуряев Д.Т. Измерение расстояний и линейных перемещений методом двулучевой лазерной интерферометрии. М.: Машиностроение, 1999. 212 с.
6. Волковец А.И., Руденко Д.Ф., Гусинский А.В., Кострикин А.М. Радиоволновой бесконтактный метод измерения параметров движения и вибрации // Доклады БГУИР. 2007. № 4(20). С. 58–64.
7. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1973. 719 с.
8. Осипов М.Н., Попов М.А. Измерения малых динамических смещений интерферометром Майкельсона со сферическими волновыми фронтами // Компьютерная оптика. 2007. Т. 31. № 4. С. 55–57. EDN:IUDQMF
9. Глебус И.С., Макаров С.Н. Волоконно-оптический виброметр на основе интерферометра Майкельсона // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2015. Т. 5. № 2. С. 28–33. EDN:TWPCIX
10. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике. СПб.: Издательство Лань, 2010. 608 с.
11. Горбатенко Б.Б., Лякин Д.В., Перепелицына О.А., Рябухо В.П. Оптические схемы и статистические характеристики сигнала спекл-интерферометров перемещений // Компьютерная оптика. 2009. № 3(33). С. 268–280. EDN:KVCQJB
12. Грязнов Н.А., Горячкин Д.А., Соснов Е.Н., Харламов В.В. Юстировка длин плеч интерферометра Майкельсона // Научное приборостроение. 2019. Т. 29. № 3. С. 41–46. DOI:10.18358/np-29-3-i4146. EDN:MIFWOZ
13. Грязнов Н.А., Горячкин Д.А., Купренюк В.И., Соснов Е.Н., Алексеев В.Л. Пассивная стабилизация интерферометра Майкельсона // Научное приборостроение. 2020. Т. 20. № 4. С. 63–74. DOI:10.18358/np-29-3-i4146. EDN:MIFWOZ
14. Осипов М.Н., Попов М.А., Попова Т.А. Поведение выходного сигнала в системе измерения на основе оптоэлектронного интерферометра Майкельсона // Ползуновский вестник. 2011. № 3-1. С. 38–41. EDN:OHFYIV
15. Плотников М.Ю., Волков А.В. Способ измерения фазового сигнала двухлучевого волоконно-оптического интерферометра. Патент на изобретение RU 2719635 C1. Оpubл. 21.04.2020. EDN:DOYETB
16. Кириеенков А.Ю., Алейник А.С., Плотников М.Ю. Способ определения разницы длин плеч в двухлучевом волоконно-оптическом интерферометре. Патент на изобретение RU 2678708 C1. Оpubл. 31.01.2019. EDN:HZSHRC
17. Запелалов А.С., Бурдюгов В.М. Способ дистанционного определения амплитуды вибрации. Патент на изобретение RU 2710098 C1. Оpubл. 24.12.2019. EDN:GLCCVD
18. Палто С.П., Гейвандов А.Р., Плато В.С. Интерферометр Майкельсона с колеблющимися зеркалами и фурьеспектрометр на его основе. Патент на изобретение RU 2580211C2. Оpubл. 10.04.2016.
19. Атавин В.Г., Худяков Ю.В., Юрчик Е.Ф. Измерение малых амплитуд вибраций лазерным виброметром // Измерительная техника. 1999. № 11. С. 29–32.
20. Атавин В.Г., Мохнатов А.А., Худяков Ю.В. Способ измерения амплитуд вибраций. Патент на изобретение RU 2217706 C2. Оpubл. 27.11.2003. EDN:SZGTMU
21. Kowarsch R., Te R., Rembe C. Laser-Doppler vibrometer microscope with variable heterodyne carrier // Journal of Physics Conference Series. 2018. Vol. 1149. P. 012016. DOI:10.1088/1742-6596/1149/1/012016
22. Костомин М.А., Титов А.А., Гарипов В.К. Измерение скорости движения и параметров вибрации объектов гетеродинным методом // Наука и образование. МГТУ им. Баумана. 2015. № 12. С. 110–118. DOI:10.7463/1215.0828437. EDN:VDRHXX
23. Капезин С.В., Базыкин С.Н., Базыкина Н.А., Самохина К.С. Лазерные измерительные системы с пространственно-временной разверткой интерференционного поля // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2015. № 2(34). С. 156–161. EDN:UISFLR
24. Базыкин С.Н. Информационно-измерительные системы для измерения линейных перемещений // Современные наукоемкие технологии. 2016. № 9. С. 373–377. EDN:WNEURN
25. Балакший В.И., Парыгин В.Н., Чирков Л.Е. Физические основы акустооптики. М.: Радио и связь, 1985. 278 с.

References

1. Fraiden D. *Modern sensors*. Moscow: Technosfera Publ.; 2005. 592 p. (in Russ.)
2. Nikolaenko A., Lvov A., Lvov P., Iurkov N. Analysis of non-contact methods for measuring linear displacements and vibrations. *Transactions of the International Symposium on Reliability and Quality, 21–31 may 2018, Penza, Russia, vol.2*. Penza: PSU Publ.; 2018. p.88–91. (in Russ.) EDN:YAFFNZ
3. Stulenkov A.V., Korotin P.I., Suvorov A.S. New applications of laser vibrometry. *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Fizicheskaya*, 2020;84(6):824–828. (in Russ.) DOI:10.31857/S0367676520060290. EDN:JWPUFG
4. Zastrogin Yu.F. *Control of motion parameters using lasers*. Moscow: Mashinostroenie Publ.; 1986. 272 p. (in Russ.)
5. Puriaev D.T. *Measurement of distances and linear displacements by two-beam laser interferometry method*. Moscow: Mashinostroenie Publ.; 1999. 212 p. (in Russ.)
6. Volkovets A., Rudenko D., Gusinskii A., Kostrikin A. Radio wave non-contact method for measuring motion and vibration parameters. *Doklady BGUIR*. 2007;4(20):58–64. (in Russ.)
7. Born M., Volf E. *Fundamentals of optics*. Moscow: Nauka Publ.; 1973. 719 p. (in Russ.)

8. Osipov M.N., Popov M.A. Measurements of small dynamic displacements by Michelson interferometer with spherical wave fronts. *Computer optics*. 2007;31(4): 55–57. (in Russ.) EDN:IUDQMF
9. Glebus I.S., Makarov S.N. Fibre optical vibrometer based on the michelson interferometer. *Interesko Geo-Sibir*. 2015;5(2):28–33. (in Russ.) EDN:TWPCIX
10. Bronshtein I.N Semendiaev K.A. *Math Reference*. St. Petersburg: Lan Publ.; 2010. 608 p. (in Russ.)
11. Gorbatenko B., Liakin D., Perepelitsyna O., Riabukho V. Optical circuits and statistical signal characteristics of speckle motion interferometers. *Computer Optics*. 2009;3(33):268–280. (in Russ.) EDN:KVCQJB
12. Gryaznov N.A., Goryachkin D.A., Sosnov E.N., Harlamov V.V. Adjusting the arm lengths of the Michelson interferometer. *Nauchnoe Priboroostroenie*. 2019;29(3):41–46. (in Russ.) DOI:10.18358/np-29-3-i4146. EDN:MIFWOZ
13. Griaznov A., Goriachkin D., Kupreniuk V., Sosnov E., Alekseev V. Passive stabilization of the Michelson interferometer. *Nauchnoe Priboroostroenie*. 2020;20(4):63–74. (in Russ.) DOI:10.18358/np-29-3-i4146. EDN:MIFWOZ
14. Osipov M., Popov M., Popova T. Output signal behavior in the measurement system based on optoelectronic Michelson interferometer. *Polzunovskiy Vestnik*. 2011;(3-1):38–41. (in Russ.) EDN:OHFYIV
15. Plotnikov M.Yu., Volkov A.V. *Method of Measuring Phase Signal of Double-Beam Fibre-Optic Interferometer*. Patent RF, no. 2719635 C1, 21.04.2020. (in Russ.) EDN:DOYETB
16. Kirieenkov A.Yu., Alejnik A.S., Plotnikov M.Yu. *Arms Length Difference Determining Method in the Double-Beam Fibre-Optical Interferometer*. Patent RF, no. 2678708 C1. 31.01.2019. (in Russ.) EDN:HZSHRC
17. Zapevalov A.S., Burdyugov V.M. *Method for Remote Determination of Vibration Amplitude*. Patent RF, no. 2710098 C1, 24.12.2019. (in Russ.) EDN:GLCCVD
18. Palto S.P Geivandov A. R. Plato V.S. *Michelson Interferometer with Oscillating Mirrors and Fourier Spectrometer Based Thereon*. Patent RF, no. 2580211 C2, 10.04.2016. (in Russ.)
19. Atavin V., Hudyakov Yu., Yurchik E. Measuring small vibration amplitudes with a laser vibrometer. *Measurement Techniques*. 1999;11:29–32. (in Russ.)
20. Atavin V.G., Mokhnatov A.A., Hudyakov Yu.V. *Procedure Measuring Amplitudes of Vibrations*. Patent RF, no. 2217706 C2. 27.11.2003. (in Russ.) EDN:SZGTMY
21. Kowarsch R., Te R., Rembe C. Laser-Doppler vibrometer microscope with variable heterodyne carrier. *Journal of Physics Conference Series*. 2018;1149(1):012016.
22. Kostomin M., Titov A., Garipov V. Measurement of motion velocity and vibration parameters of objects by hetero-bin method. *Science and Education of Bauman MSTU*. 2015;12:110–118. DOI:10.7463/1215.0828437. (in Russ.) EDN:VDRHXX
23. Kapezin S.V., Bazykin S.N., Bazykina N.A., Samokhina K.S. Lazer measuring systems with space-time scan of interference field. *University proceedings. Volga region. Technical sciences*. 2015;2(34):156–161. (in Russ.) EDN:UISFLR
24. Bazykin S.N. Information-measuring systems for measuring linear displacements. *Modern high technologies*. 2016;9: 373–377. (in Russ.) EDN:WNEURN
25. Balakshii V.I., Parygin V.N., Chirkov L.E. *Physical foundations of acousto-optics*. Moscow: Radio i Svyaz Publ.; 1985. 278 p. (in Russ.)

Статья поступила в редакцию 09.07.2023; одобрена после рецензирования 18.03.2024; принята к публикации 20.03.2024.

The article was submitted 09.07.2024; approved after reviewing 18.03.2024; accepted for publication 20.03.2024.

Информация об авторах:

КРАВЕЦ
Елена Валентиновна

кандидат технических наук, доцент кафедры радиосвязи и вещания Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича
 <https://orcid.org/0009-0005-1096-6655>

СЕМЕНОВА
Елена Георгиевна

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой 07 «Информационные системы и программная инженерия» Балтийского государственного технического университета «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова
 <https://orcid.org/0000-0001-8312-4903>