

УДК 53.082.5; 681.787

## ИЗМЕРЕНИЕ АМПЛИТУДЫ УПРУГИХ СМЕЩЕНИЙ КВАРЦЕВОГО РЕЗОНАТОРА

**Я. Л. Вороховский,**

канд. техн. наук, генеральный директор

**В. В. Молоток,**

доктор техн. наук, зам. директора

ОАО «Морион»

**В. В. Клудзин,**

доктор техн. наук, профессор

**Л. Н. Пресленев,**

канд. техн. наук, доцент

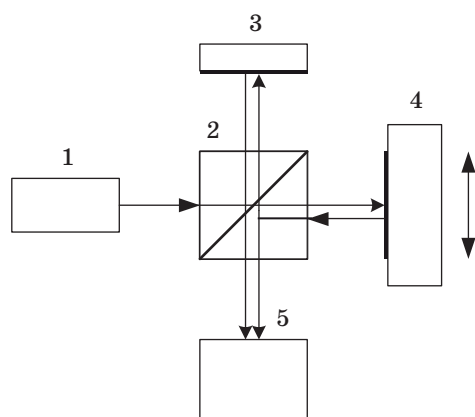
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

Анализируются и экспериментально исследуются две схемы оптического интерферометра, предназначенные для измерений пространственных распределений акустических смещений на поверхности кварцевого резонатора. Вводимая в схему интерферометра акустооптическая ячейка служит для смещения частоты оптического сигнала, что позволяет заметно повысить стабильность и надежность процесса измерений и оценивать абсолютное значение амплитуды акустических смещений на поверхности резонатора. Проведен анализ чувствительности интерферометра на основе оценки уровня шумов и оптимального выбора параметров устройства.

**Ключевые слова** — оптический интерферометр, акустооптическая ячейка, упругие смещения, опорная волна, спектр фазомодулированного сигнала, чувствительность устройства.

### Введение

Пространственные распределения амплитуды смещений могут быть измерены оптическим методом на основе использования интерферометра Майкельсона (рис. 1).



■ **Рис. 1.** Схема интерферометра Майкельсона для измерения величины упругого смещения на поверхности кварцевого резонатора

В схеме интерферометра поступающий от источника когерентного оптического излучения (лазера) 1 оптический сигнал на фотоприемнике 5  $\dot{e}(t)$  состоит из двух компонент, одна из которых формируется в вертикальном плече за счет отражения от зеркала 3 и обозначается как опорная волна  $\dot{e}_0(t, r)$ . Вторая компонента формируется в горизонтальном плече за счет двойного отражения от вибрирующей поверхности кварцевого резонатора 4 и возвращающего зеркала 2 и обозначается как сигнальная волна  $\dot{e}_S(t, r)$ . Если опорная волна записывается в традиционной форме как

$$e_0(t, r) = E_0 \cos(\omega_0 t - kr + \varphi_1(t)),$$

то волна сигнальная  $\dot{e}_S(t, r)$  содержит фазовые изменения вследствие колебаний резонатора:

$$e_S(t, r) = E_S \cos(\omega_0 t + m \cos \Omega t - kr + \varphi_2(t)),$$

где  $\varphi_1(t)$ ,  $\varphi_2(t)$  — фазовые набег в разных плечах интерферометра.

При согласовании фазовых фронтов опорной и сигнальной волн реализуется их простран-

ственная когерентность, поэтому пространственными и угловыми координатами в выражении для обеих волн можно пренебречь. Тогда можно считать, что на входе фотоприемника действует сумма двух сигналов  $\dot{e}_\phi(t) = \dot{e}_0(t) + \dot{e}_S(t)$ , а в отклике приемника на эту сумму следует выделить интермодуляционную составляющую  $I_\phi \sim 2\eta\dot{e}_0(t)\dot{e}_S(t)$ . Очевидно, что полезная компонента тока фотоприемника  $I_\phi(t) = 0,25\eta P_0 \cos(m\cos\Omega t + \varphi(t))$ , где  $\eta$  — чувствительность фотоприемника;  $\varphi(t) = \varphi_2(t) - \varphi_1(t)$  — разность фаз;  $m = 4\pi U/\lambda_0$  — индекс фазовой модуляции;  $U$  — амплитуда смещения на поверхности резонатора;  $\lambda_0$  — длина оптической волны. Здесь предполагается, что  $E_0 \approx E_S = 0,5\sqrt{P_0}$ , где  $P_0$  — мощность лазерного потока.

В общем случае спектр выходного сигнала фотоприемника зависит от разности фаз  $\varphi(t)$  и при малом индексе модуляции  $m \ll 1$  может быть представлен в форме

$$I_\phi = I_0 \{ (1 - 0,25m^2)\cos\varphi - m\cos\Omega t \sin\varphi - 0,25m^2\cos 2\Omega t \cos\varphi \},$$

где  $I_0 = 0,25\eta P_0$ . Характерно, что максимальное значение амплитуды гармоники  $\Omega$  реализуется при  $\varphi = \pi/2$ , а при  $\varphi \approx N\pi$  ( $N$  — целое число) амплитуда второй гармоники  $2\Omega$  уменьшается в  $0,25m$  раз сравнительно с первой и появляется значительная по уровню постоянная составляющая. В процессе измерений разность фаз  $\varphi$  может заметно изменяться за счет локальных флуктуаций температуры, влажности, вибраций и пр. Значение разности фаз  $\varphi$  определяется оптическими длинами плеч интерферометра  $n_1L_1, n_2L_2$ :

$$\varphi(t) = 2\pi(n_1L_1 - n_2L_2)/\lambda_0.$$

Кроме того, на разность фаз  $\varphi$  оказывают влияние пространственные и угловые рассогласования между опорным и сигнальным лучами [1].

Требования, предъявляемые к усилительной части устройства, заключаются в оптимальном выборе полосы пропускания  $\Delta f$  фотоприемного тракта и минимизации коэффициента шума предварительного усилителя  $N$ .

Минимальный уровень амплитуды смещения (чувствительность)  $U_m$ , который может фиксировать устройство, определяется уровнем собственных шумов, среди которых наиболее важными являются тепловые и дробовые компоненты шума. Мощность теплового шума  $P_T$  с учетом влияния предварительного усилителя может быть оценена как  $P_T = 4NkT\Delta f$ , где  $k$  — постоянная Больцмана;  $T$  — абсолютная температура. Если положить  $N = 10$ ,  $T = 290$  К,  $\Delta f = 50$  Гц, то  $P_T = 8 \cdot 10^{-18}$  Вт, в то время как мощность дробово-

го шума  $P_{др} = 2eI_0\Delta fR$ , где  $e$  — заряд электрона;  $I_0$  — полный ток фотоприемника, зависящий от мощности оптического сигнала на его входе. При условии, что  $P_0 = 0,1$  мВт,  $\eta = 0,2$  А/Вт,  $R = 10^3$  Ом,  $P_{др} = 6,4 \cdot 10^{-19}$  Вт, полная мощность шума составит  $P_{ш} = 8,6 \cdot 10^{-18}$  Вт.

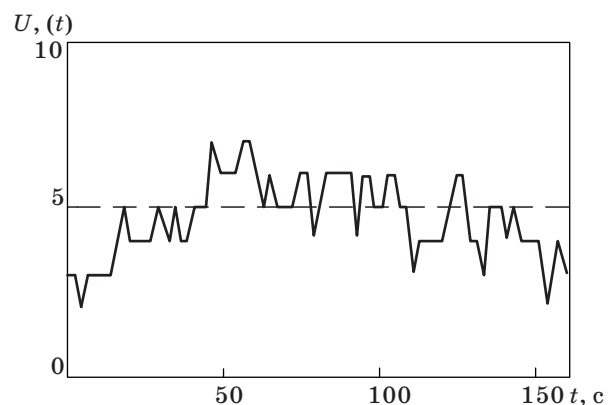
В этих условиях мощность сигнала  $P_c$  на выходе фотоприемника может быть определена как  $P_c = 0,5 \cdot I_\phi^2 R = 0,5m^2\eta^2 P_0^2 R$ . Если предположить, что сигнал должен превышать уровень полной мощности шума в 10 раз, то может быть найдена минимальная величина смещения  $U_m$  на поверхности резонатора, уверенно регистрируемая устройством. При выбранных значениях чувствительность интерферометра составляет  $U_m = 10^{-12}$  м =  $0,01$  Å, что соответствует акустической мощности в резонаторе  $\sim 2,2$  мкВт.

В процессе исследования основной проблемой оказалась высокая нестабильность амплитуды отклика на экране анализатора спектра по нескольким причинам, которые зависят от параметров генератора и элементов схемы интерферометра (механических подвижек и лазера). Однако главным источником нестабильности следует считать флуктуации разности фаз  $\varphi(t)$ .

Подтверждением сказанного являются измерения, проведенные в стационарном состоянии механических подвижек, которые показали значительную нестабильность уровня выходного сигнала. Эюра колебаний уровня отклика на экране анализатора спектра в течение  $\approx 2,5$  мин с шагом 2 с представлена на рис. 2.

В некоторые моменты времени выходной сигнал на резонансной частоте  $\Omega$  резонатора полностью исчезал и при этом заметно возрастал уровень шума, по-видимому, за счет значительного увеличения дробовой компоненты.

Проведенные исследования показали принципиальную возможность использовать методы оптической интерферометрии для измерений относительных распределений амплитуды смеще-



■ Рис. 2. Временные флуктуации выходного сигнала интерферометра

ний резонатора. Оптический интерферометр позволяет реализовать наивысшую чувствительность при оптимальном выборе параметров устройства, но в то же время эта схема интерферометра обладает существенной нестабильностью в уровнях выходного сигнала, особенно если процесс измерения сопровождается механическими перемещениями элементов схемы.

### Интерферометр с акустооптической ячейкой

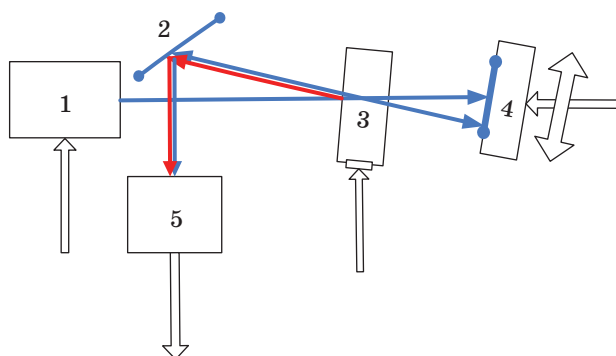
Традиционная схема интерферометра Майкельсона обладает рядом недостатков, причем наиболее важными являются существенная нестабильность уровня выходного сигнала при флуктуации разности фаз между оптическими сигналами и невозможность точного измерения индекса модуляции  $m$ .

Эти недостатки устраняются смещением частоты одного из взаимодействующих оптических пучков, например с помощью акустооптического модулятора (АОМ) [2]. При этом в плоскости фотоприемника формируется динамическое распределение поля, а спектр электрического сигнала на выходе фотоприемника формируется на частоте управляющего сигнала АОМ.

При включении следом за фотоприемником радиочастотного анализатора спектра можно быстро и точно определить индекс фазовой модуляции  $m$ . При этом на экране анализатора получается спектрограмма, характерная для ФМ-сигнала с малым индексом модуляции. При измерении отношения уровней центральной спектральной компоненты и одной из боковых вычисляется индекс фазовой модуляции в соответствии с соотношением

$$m = 2U_{\text{бок}} / U_{\text{центр}} = 4\pi U / \lambda_0.$$

Интерферометр с АОМ может быть построен по различным схемам. Один из вариантов использует в качестве опорного оптический пучок, отраженный от одной из граней АОМ (рис. 3). В этом



■ Рис. 3. Схема интерферометра с АОМ

случае АОМ используется только как устройство смещения частоты оптического излучения.

Управляющий сигнал с генератора поступает на АОМ 3, преобразуется в акустический сигнал, распространяющийся вдоль модулятора. Луч лазера 1, падая на АОМ, частично отражается от передней грани, тем самым образуя опорный пучок  $e_0(t)$ , и затем дифрагирует в среде АОМ. Отражаясь от резонатора 4, дифракционный луч  $e_S(t)$  попадает на зеркало 2 и коллинеарно с отраженным пучком поступает на фотоприемник 5. Выходной сигнал фотоприемника поступает на вход радиочастотного анализатора спектра.

В этом случае опорный сигнал  $e_0(t)$  формируется при отражении лазерного луча от передней грани АОМ в форме

$$e_0(t) = E_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_1(t)),$$

где  $E_0 = g\sqrt{P_0}$ ,  $g$  — амплитудный коэффициент отражения оптической волны от передней грани АОМ ( $g = 0,17$ ).

Сигнальная компонента  $e_S(t)$  образована дифрагированным лучом, который отражается от колеблющейся поверхности резонатора и поэтому приобретает форму

$$e_S(t) = E_S \cos((\omega_0 - \omega_a)t + m \cos \Omega t + \varphi_2(t)),$$

где  $E_S = \sqrt{\gamma P_0}$ ,  $\gamma$  — коэффициент, характеризующий эффективность акустооптического взаимодействия в АОМ ( $\sqrt{\gamma} = 0,4 - 0,8$  в зависимости от уровня управляющего сигнала АОМ);  $\omega_a$  — частота акустического сигнала, определяющая доплеровский сдвиг частоты оптического сигнала при дифракции на движущейся решетке, созданной акустической волной в среде АОМ.

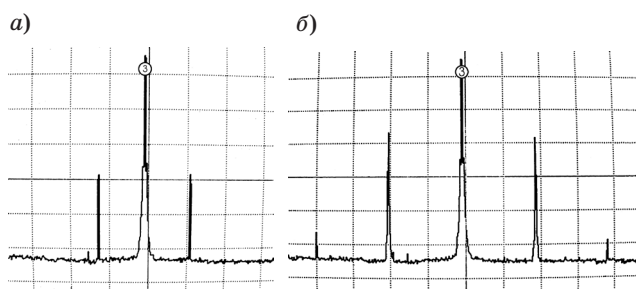
Для этой схемы комбинационная компонента тока фотоприемника представляет собой классический фазомодулированный сигнал

$$I_\varphi = I_0 \{ \cos(\omega_a t + \varphi) - 0,5m \sin((\omega_a + \Omega)t + \varphi) - 0,5m \sin((\omega_a - \Omega)t + \varphi) \},$$

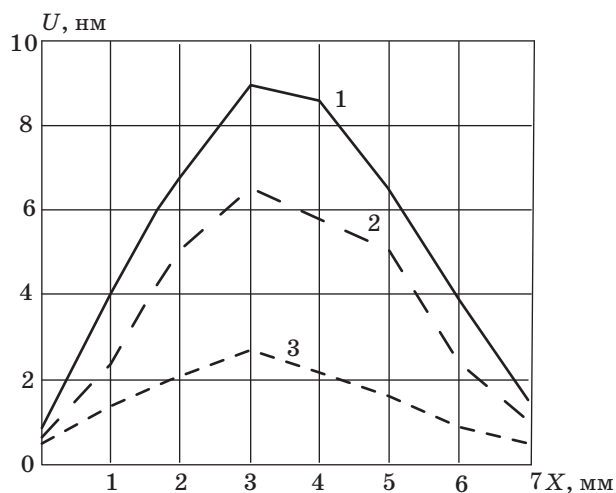
где  $I_0 = \eta E_0 E_S = \eta g P_0 \sqrt{\gamma}$ .

Амплитудный спектр этого сигнала практически не зависит от флуктуирующей разности фаз  $\varphi$  и позволяет достаточно точно измерять индекс фазовой модуляции  $m$  и амплитуду акустического смещения резонатора  $U$ .

Экспериментально наблюдаемые спектры для третьей (3062,68 кГц) и пятой (5075,45 кГц) гармоник кварцевого резонатора показаны на рис. 4. Масштаб по оси ординат — логарифмический, одна клетка — 10 дБ. Центральная частота спектра определяется частотой управляющего сигнала АОМ и составляет ~30 МГц. При значительном



■ **Рис. 4.** Спектры выходных сигналов интерферометра при возбуждении: а — третьей гармоники резонатора напряжением 0,4 В,  $m = 0,044$ ,  $U = 23 \text{ \AA}$ ; б — пятой гармоники резонатора напряжением 1 В,  $m = 0,11$ ,  $U = 58 \text{ \AA}$



■ **Рис. 5.** Пространственные распределения амплитуды смещений: 1 — вдоль диаметра резонатора; 2 — на 1 мм ниже центральной оси резонатора; 3 — на 2 мм ниже центральной оси резонатора

увеличении уровня центральной компоненты (более -10 дБм на входе анализатора спектра) проявляются нелинейные эффекты элементов приемного тракта.

При индексе модуляции  $m = 0,11$  (см. рис. 4, б) наряду с основной парой боковых гармоник появляются высшие спектральные компоненты, уро-

вень которых определяется значением функции Бесселя второго порядка. Экспериментально измеренный минимальный уровень амплитуды упругого смещения составлял  $0,2 \text{ \AA}$  при амплитуде сигнала на резонаторе  $\sim 4$  мВ. Пространственные нормированные распределения амплитуды смещений поверхности кварцевого резонатора представлены на рис. 5.

Можно избавиться от механических перемещений резонатора, введя электронное сканирование оптического луча, если АОМ придать функции дефлектора. Однако в этом случае значительно уменьшается степень использования энергии оптического луча, снижается чувствительность устройства и возрастают вероятности возникновения погрешностей рассогласования при юстировке устройства.

### Заключение

Схема интерферометра с использованием АОМ позволяет эффективно и точно измерять амплитуду упругого смещения и фиксировать пространственные распределения величины смещения по поверхности резонатора. Минимальный уровень экспериментально измеренной амплитуды смещения составлял  $0,2 \text{ \AA}$ , в то время как теоретический предел —  $0,01 \text{ \AA}$ . В процессе измерений распределений возможны рассогласования фазовых фронтов сигнального и опорного лучей, что связано с угловой нестабильностью устройств механического перемещения резонатора.

### Литература

1. Tynes A. R., Bisbee D. L. Precise interferometry of glass plates // IEEE J. Quantum Electronics. Nov. 1967. Vol. QE-3. P. 459–463.
2. Whitman R. L., Laub L. J., Bates W. J. Acoustic surface displacement on a wedge-shaped transducer using an optical probe technique // IEEE transactions. 1968. Vol. SU-15. N 3. P. 186–189.