

Изобретение относится к измерительной технике и может быть использовано в измерителях линейных и угловых перемещений, в фазосдвигающих устройствах оптического и радиотехнического диапазона.

Известно "Устройство для измерения фазовых сдвигов лазерного излучения" (авт. св. СССР г* 1383089), содержащее лазер, светоделительные устройства, оптический затвор, отражающий элемент, элемент совмещения световых пучков, фотоприемник, два акустооптических модулятора (АОМ) и систему формирования световых пучков. Электронная часть включает радиочастотный фазометр, радиочастотный смеситель, генераторы питания АОМ, систему ФАПЧ с опорным генератором.

Недостатком указанного фазометра является то, что на результат измерения существенное влияние оказывают вибрации, температурные изменения окружающей среды, нестабильность генераторов питания АОМ.

Известен "Фазометр оптического диапазона (авт. св. СССР Ns 1411572), в котором для уменьшения габаритов фазометра АОМ располагают последовательно в одном канале по ходу луча лазера, а на пути распространения дифрагированных лучей размещены уголковые отражатели и средства совмещения этих лучей.

Недостатком указанного фазометра является то, что вибрация приводит к нестабильности показания фазометра. Температурные нестабильности приводят к систематическому уходу фазы. Нестабильность генератора, питающего АОМ, не исключается. Во всех случаях с вибрацией можно бороться путем использования виброустойчивых оснований интерферометра, а с температурными - путем использования материалов с малыми температурными коэффициентами расширения. Такие меры борьбы требуют дополнительных материальных затрат, увеличивают габариты приборов и не всегда приемлемы в производственных условиях, особенно в машиностроительной промышленности.

Наиболее близким по технической сущности к изобретению является фазометр оптического диапазона ("Образцовая электронно-оптическая аппаратура для измерения фазовых сдвигов в ИК и видимом диапазоне". - ПТЭ. №6, 1985, с.219), содержащий лазер, элементы разделения излучения на два оптических канала, два АОМ, включенные в эти каналы и установленные под углом Брэгга по отношению к падающему лучу света, два уголковых отражателя, два элемента совмещения лучей, фотоприемник, установленный на пути распространения совмещенных дифрагированных лучей, два генератора возбуждения АОМ, смеситель электрических сигналов, систему регистрации фазового сдвига. При этом выходы генераторов возбуждения АОМ подключены ко входам смесителя электрических сигналов, а выход смесителя электрических сигналов и выход фотоприемника подключены ко входам системы регистрации фазового сдвига.

Недостатком указанного фазометра является то, что на стабильность измерения среднего значения угла сдвига фаз существенное влияние оказывают температурная нестабильность окружающей среды, вибрации элементов оптической части измерительной системы и взаимная нестабильность генераторов возбуждения АОМ. Это объясняется тем, что нестабильности, возникающие в блоках двухканальной системы, слабо взаимно коррелированы между собой и не исключают друг друга. Поэтому дополнительные фазовые сдвиги, имеющие случайный характер, не компенсируются, а существенно увеличивают погрешность измерения угла фазового сдвига за счет смещения оценки усредненного значения.

В основу изобретения поставлена задача усовершенствования фазометра оптического диапазона, в котором акустооптические модуляторы совмещены на одной платформе и возбуждаются от одного генератора возбуждения акустооптических модуляторов, что обеспечивает снижение влияния вибраций и исключение температурной и частотной взаимной нестабильности генераторов возбуждения акустооптических модуляторов на результат измерения, и за счет этого повышается точность измерения среднего значения угла фазового сдвига.

Поставленная задача решается тем, что в фазометре оптического диапазона, содержащем лазер, элементы разделения луча света на два оптических канала, выполненные в виде полупрозрачного и отражающего зеркал, два акустооптических модулятора, включенные в эти каналы и установленные под углом Брэгга по отношению к падающему лучу света, два уголковых отражателя, два элемента совмещения лучей, выполненные в виде зеркала и оптического смесителя, фотоприемник, генератор возбуждения акустооптических модуляторов, смеситель электрических сигналов и систему регистрации фазового сдвига, согласно изобретению акустооптические модуляторы совмещены на одной платформе и их электрические входы подключены к выходу генератора возбуждения акустооптических модуляторов, входы смесителя электрических сигналов подключены к выходам фотоприемника и генератора возбуждения акустооптических модуляторов, а входы системы регистрации фазового сдвига подключены к выходам смесителя электрических сигналов и генератора возбуждения акустооптических модуляторов.

На чертеже представлена структурная схема фазометра оптического диапазона.

Фазометр оптического диапазона содержит лазер 1, элементы разделения луча света на два оптических канала, выполненные в виде полупрозрачного 2 и отражающего 3 зеркал, два АОМ 4 и 5, включенные в эти каналы и установленные под углом Брэгга по отношению к падающему лучу света, два уголковых отражателя 6 и 7, два элемента совмещения лучей выполненные в виде отражающего зеркала 8 и оптического смесителя 9, фотоприемник 10, генератор возбуждения АОМ 11, подключенный к электрическим входам АОМ 4 и 5, смеситель электрических сигналов 12, входы которого подключены к выходам фотоприемника 10 и генератора возбуждения АОМ 11, систему регистрации фазового сдвига 13, входы которой подключены к выходам генератора возбуждения АОМ 11 и смесителя электрических сигналов 12, и оптически прозрачные объект 14.

Устройство работает следующим образом.

Излучение лазера 1 с помощью полупрозрачного зеркала 2 и отражающего зеркала 3 разделяется на два излучения, на пути которых под углом Брэгга установлены акустооптические модуляторы 4 в первом 5 во втором каналах соответственно. На электрические входы акустооптических модуляторов подается напряжения возбуждения акустических волн от генератора 11 возбуждения акустооптических модуляторов (50... 100 МГц). В результате акустического взаимодействия лазерного излучения с частотой f_0 и волны

возбуждения с частотой F на выходах акустооптических модуляторов за счет дифракции излучения лазера появляется дифрагированные лучи - 1 порядка в первом канале и +1 порядка во втором канале. Лучи нулевого порядка, +1 порядка в первом канале и -1 порядка во втором канале не используются. Дифрагированный луч +1 порядка имеет частоту (f₀+F), а дифрагированный луч -1 порядка имеет частоту (f₀-F). Эти лучи на выходах АОМ излучаются под углом Брэгга, равном

$$2\theta = \arcsin \frac{\lambda}{\lambda_0}, \quad (1)$$

где λ- длина акустической волны в модуляторе;
λ₀ - длина волны лазерного излучения.

Так как λ₀ << λ, то на сравнительно небольшой базе можно обеспечить пространственную фильтрацию лучей на выходе АОМ 4 и 5. Таким образом, лучи с частотами (f₀-F) и (f₀+F) подаются на уголкового отражателя 6 и 7, отраженные лучи от которых совмещаются в пространстве с помощью отражающего зеркала 8 и оптического смесителя 9. Дифрагированные совмещенные лучи с оптического смесителя 9 интерферируют на апертуре фотоприемника 10. Детектирование интерферирующего луча в случае квадратичного режима позволяет получить на выходе фотоприемника 10 напряжение:

$$U_2(t) = b E_1^{-1} E_2^{-1} \cos \{ [(\omega_0 - \Omega)t + \Delta\varphi_{\omega 1}^{-1} + \Delta\varphi_1^{-1} + \Delta\varphi_{\omega 1}^{-1}] - [(\omega_0 + \Omega)t + \Delta\varphi_{\omega 2}^{-1} + \Delta\varphi_2^{-1} + \Delta\varphi_{\omega 2}^{-1} + \varphi_0] \} = b E_1^{-1} E_2^{-1} \times \times \cos \{ 2\Omega t + (\Delta\varphi_{\omega 2}^{-1} - \Delta\varphi_{\omega 1}^{-1}) + (\Delta\varphi_2^{-1} - \Delta\varphi_1^{-1}) + (\Delta\varphi_{\omega 2}^{-1} - \Delta\varphi_{\omega 1}^{-1}) + \varphi_0 \}, \quad (2)$$

где Ω=2πF, ω₀=2πf₀- круговая частота сигнала от генератора 11 возбуждения АОМ и круговая частота лазерного излучения соответственно;

φ₀- фазовый сдвиг, вносимый оптически прозрачным объектом 14, либо вносимый при перемещении уголкового отражателя 7;

Δφ_{ω1}⁻¹ и Δφ_{ω2}⁻¹ - фазовые нестабильности, вносимые АОМ 4 и 5 при вибрациях;

Δφ₁⁻¹ и Δφ₂⁻¹ - фазовые нестабильности, возникающие в АОМ 4 и 5 за счет ухода частоты генератора 11 возбуждения АОМ;

Δφ_{ω1}⁻¹ и Δφ_{ω2}⁻¹ - фазовые задержки света в первом и во втором каналах интерферометра соответственно;

b - коэффициент, характеризующий чувствительность фотоприемника 10.

Так как каналы оптической части фазометра имеют идентичные наклоны фазочастотных характеристик и возбуждение АОМ 4 и 5 осуществляется от одного генератора 11 возбуждения АОМ, то выполняется условие: Δφ_{ω1}⁻¹ = Δφ_{ω2}⁻¹. Фазовый набег между каналами Δφ = Δφ_{ω2}⁻¹ - Δφ_{ω1}⁻¹ з.и за счет разности хода лучей з каналов можно исключить установкой "нуля" системы регистрации фазового сдвига перед началом измерения.

Напряжение U₂(t) кроме полезной информации, имеющейся в фазовом сдвиге φ₀, содержит и неинформационную разность фаз (Δφ_{ω2}⁻¹ - Δφ_{ω1}⁻¹), определяющуюся взаимной нестабильностью параметров двух оптических каналов (вибрациями). Информационную разность фаз трудно компенсировать из-за случайного характера фазовых нестабильностей, возникающих в различных элементах схемы.

Далее напряжения U₂(t) и U₁(t) (с выхода генератора 11 возбуждения АОМ) подаются на входы смесителя электрических сигналов 12, напряжение на выходе которого определяется выражением

$$U_3(t) = U_{mc} \cos(\Omega t + \Delta\varphi_{\omega 2}^{-1} - \Delta\varphi_{\omega 1}^{-1} + \varphi_0), \quad (3)$$

где U_{mc} - амплитуда выходного напряжения смесителя электрических сигналов 12.

После этого напряжения U₁(t) и U₃(t) подаются на входы системы регистрации фазового сдвига 13. Это устройство измеряет угол сдвига фаз, который можно найти из выражения

$$\varphi_{изм} = \Delta\varphi_{\omega 2}^{-1} - \Delta\varphi_{\omega 1}^{-1} + \varphi_0. \quad (4)$$

В общем случае фазовые нестабильности Δφ_{ω1}⁻¹ и Δφ_{ω2}⁻¹ слабо коррелированы и взаимно не компенсируются. Но в данном устройстве предлагается совместить АОМ на одной платформе и возбуждать от одного генератора возбуждения АОМ 11, что значительно уменьшит влияние вибраций и повысит степень корреляции вибрационных фазовых нестабильностей практически до полной их взаимокompенсации. С учетом этом взаимокompенсации, позволяющей существенно повысить точность измерения среднего значения угла фазового сдвига, измеряемый сдвиг фаз

$$\varphi_{изм} = \varphi_0. \quad (5)$$

В устройстве-прототипе эти вибрационные составляющие погрешности взаимно не компенсируются, так как фазовый сдвиг измеряется между вспомогательным напряжением, которое формируется в результате смешивания колебаний двух генераторов возбуждения АОМ и выделения напряжения разностной частоты, и напряжением с выхода фотоприемника.

Предлагаемый фазометр оптического диапазона можно использовать в измерителях малых линейных перемещений. Если один из уголкового отражателей, например 7, перемещать в плоскости распространения падающего луча на величину Δl, то задержка, выраженная через угол фазового сдвига, будет равна

$$\varphi_{изм} = \varphi_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0} 2\Delta l. \quad (6)$$

Например, при длине волны лазера λ₀=0.63мкм и погрешности измерения фазового сдвига 0,1° погрешность измерения перемещения δl=0,0001 мкм.

Для того, чтобы компенсировать фазовый сдвиг, вносимый за счет малого линейного перемещения

углового отражателя 7 (объекта измерения, который на чертеже не указан), необходимо переместить АОМ 4 и 5 на величину ΔX в плоскости, перпендикулярной плоскости падающего луча лазера. В этом случае система регистрации фазового сдвига 13 установится в "нуль". Тогда выражение (6) можно переписать в таком виде

$$\varphi_{\text{изм}} = \varphi_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0} 2 \Delta l = \Delta\varphi_{\text{м}2}^1 - \Delta\varphi_{\text{м}1}^{-1} = -\frac{2\pi}{\lambda} \Delta X - \left(-\frac{2\pi}{\lambda} \Delta X\right) = \frac{2\pi}{\lambda} 2 \Delta X, \quad (7)$$

где $\Delta\varphi_{\text{м}1}^{-1}$ и $\Delta\varphi_{\text{м}2}^1$ - фазовые сдвиги, вносимые АОМ 4 и 5 при их перемещении на величину ΔX .

АОМ 4 и 5 устанавливаются на одной платформе, перемещающейся так, чтобы для луча в первом канале акустическая волна набегала на световую, а во втором - уходила от падающей световой волны, т. е. $\Delta\varphi_{\text{м}1}^{-1}$ и $\Delta\varphi_{\text{м}2}^1$ имеют противоположные знаки и в интерферирующем луче складываются.

Для АОМ, выполненного из плавленного кварца, при дифракции света на ультразвуке с частотой 80 МГц длина волны ультразвука в материале модулятора составит

$$\lambda = \frac{V}{F} = \frac{5,96 \cdot 10^3}{80 \cdot 10^6} = 75 \text{ мкм.}$$

При компенсационном методе измерения можно оценить повышение разрешающей способности измерения малых линейных перемещений

$$m = \frac{2 \Delta X}{2 \Delta l} = \frac{\lambda}{\lambda_0} = \frac{75 \cdot 10^{-6}}{0,63 \cdot 10^{-6}} = 120.$$

С увеличением масштабного коэффициента m растет точность измерения малых линейных перемещений.

Перемещение углового отражателя 7 может превышать длину волны λ_0 , если система регистрации фазового сдвига 13 способна вести счет фазовых циклов, т. е. целого числа 2π . Таким образом, предлагаемое устройство можно использовать как измеритель малых линейных перемещений в прецизионном машиностроении и микроэлектронике.

Предлагаемый фазометр оптического диапазона можно также использовать для калибровки фазовращателей, включаемых между выходом генератора 11 возбуждения АОМ и входом смесителя электрических сигналов 12, используя систему регистрации фазового сдвига 13 как нуль-индикатор.

Задание фазового сдвига осуществляется перемещением АОМ 4 и 5 на величину ΔX , при этом пространственная фаза акустической волны изменяется на величину

$$\Delta\varphi = k \cdot 2 \Delta X = \frac{2\pi}{\lambda} 2 \Delta X, \text{ где } \Delta X$$

- линейное перемещение АОМ. Таким образом, АОМ 4 и 5 служат в качестве оптического фазовращателя и их линейное перемещение, измеряемое измерителем линейных перемещений (на чертеже не указан), определяет задаваемый фазовый сдвиг на выходе фотоприемника 10. Передвигая АОМ 4 и 5 на расстояние ΔX , равное половине длины акустической волны λ , можно получить регулируемый фазовый сдвиг в пределах $0 \dots 360^\circ$.

Рабочая частота современных АОМ лежит в пределах 1...100 МГц, фотоэлектрические преобразователи (фотоприемники) также работоспособны в данной полосе частот, что позволяет создавать прецизионные калибраторы фазы для диапазона 1...100 МГц. Точность задания фазового сдвига перемещением АОМ определяется точностью измерения линейного перемещения АОМ 4 и 5, которое для современной аппаратуры линейных перемещений составляет $\delta l = 0,005 \dots 0,01$ мкм. Длина акустической волны в АОМ 4 и 5 в диапазоне 1... 100 МГц $\lambda = 0,35 \dots 6$ мм для основных акустооптических материалов (плавленный кварц, германий, молибдат свинца). Тогда погрешность задания фазовых сдвигов в диапазоне 1...100 МГц будет лежать в пределах $0,0003 \dots 0,1^\circ$, что позволяет с высокой точностью калибровать фазовращатели радиодиапазона.

