РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2719635

Способ измерения фазового сигнала двухлучевого волоконно-оптического интерферометра

Патентообладатель: ***федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский университет ИТМО" (Университет ИТМО) (RU)***

Авторы: ***Плотников Михаил Юрьевич (RU),***
Волков Антон Валерьевич (RU)

Заявка № **2019117447**
Приоритет изобретения **04 июня 2019 г.**
Дата государственной регистрации в Государственном реестре изобретений Российской Федерации **21 апреля 2020 г.**
Срок действия исключительного права на изобретение истекает **04 июня 2039 г.**

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) **RU** (11) **2 719 635**(13) **C1**

(51) МПК
G01B 9/02 (2006.01)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК
G01B 9/0207 (2020.02)

(21)(22) Заявка: **2019117447, 04.06.2019**

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
04.06.2019

Дата регистрации:
21.04.2020

Приоритет(ы):
(22) Дата подачи заявки: **04.06.2019**

(45) Опубликовано: **21.04.2020** Бюл. № **12**

Адрес для переписки:
197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49, Университет ИТМО, ОИС и НТИ

(72) Автор(ы):
Плотников Михаил Юрьевич (RU),
Волков Антон Валерьевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):
федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский университет ИТМО" (Университет ИТМО) (RU)

(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: **US 5227857 A, 13.07.1993. A. Dandridge "Zero Path-Length Difference in Fiber-optic Interferometers", Journal of lightwave technology, vol. LT-1, No. 3, September 1983. US 2005088660 A1, 28.04.2005. WO 199407109 A1, 31.03.1994. O.Furukawa, Y. Tanaka "Time division multiplexing for multipoint measurement of dynamic displacement using interferometer**
(см. прод.)

(54) Способ измерения фазового сигнала двухлучевого волоконно-оптического интерферометра

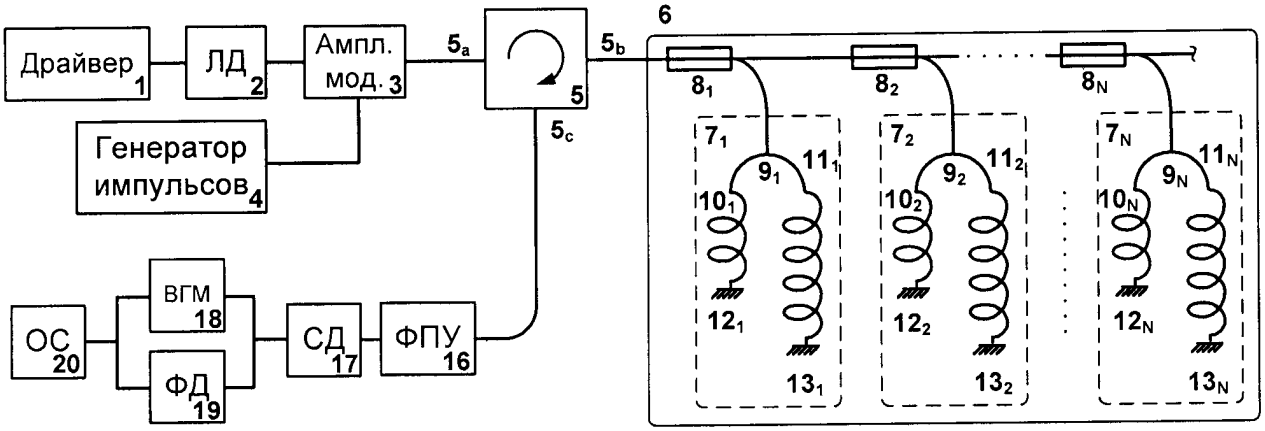
(57) Реферат:

Изобретение относится к области волоконно-оптических измерительных приборов и может быть использовано для повышения точности измерения фазового сигнала в двухлучевых интерферометрах Майкельсона или Маха-Цендера и массивах волоконно-оптических датчиков на их основе. Способ измерения фазового сигнала двухлучевого интерферометра включает формирование модулированного оптического сигнала с помощью частотной модуляции источника оптического излучения, частотно-модулированный оптический сигнал дополнительно модулируют по амплитуде с помощью амплитудного модулятора путем подачи на него прямоугольных электрических импульсов постоянной скважности и одинаковой амплитуды и направляют его в двухлучевые волоконно-оптические разбалансированные интерферометры - один опорный и один или N-1 измерительных, где N - максимальное число двухлучевых волоконно-оптических интерферометров, объединенных в массив с мультиплексированием по времени в соответствии с оптическим бюджетом оптической схемы (N=2, 3, 4, …), выходные частотно-модулированные оптические сигналы с волоконно-оптических интерферометров регистрируют с помощью фотоприемных устройств, выполняющих их фотоэлектрическое преобразование, получившиеся электрические сигналы каждого интерферометра преобразуют посредством синхронного детектирования в наборы квадратурных сигналов - синусных и косинусных сигнальных компонент, с их помощью определяют глубину частотной модуляции сигнала каждого интерферометра, осуществляют

RU 2719635 C1

RU 2719635 C1

фазовую демодуляцию квадратурных сигналов каждого интерферометра и получают искомый фазовый сигнал каждого измерительного интерферометра путем вычитания демодулированного фазового сигнала опорного интерферометра, умноженного на отношение измеренных глубин частотной модуляции в измерительном интерферометре и опорном интерферометре, из демодулированного фазового сигнала измерительного интерферометра. Технический результат – повышение точности. 3 ил.



Фиг. 1

(56) (продолжение):
with phase-modulated reference light", Japanese Journal of Applied Physics 58, 050902 (2019).

RU 2719635 C1

RU 2719635 C1

RUSSIAN FEDERATION

FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(19) **RU** (11) **2 719 635**(13) **C1**

(51) Int. Cl.
G01B 9/02 (2006.01)

(12) ABSTRACT OF INVENTION

(52) CPC
G01B 9/0207 (2020.02)

(21)(22) Application: **2019117447, 04.06.2019**

(24) Effective date for property rights:
04.06.2019

Registration date:
21.04.2020

Priority:
(22) Date of filing: **04.06.2019**

(45) Date of publication: **21.04.2020** Bull. № **12**

Mail address:
197101, Sankt-Peterburg, Kronverkskij pr., 49, Universitet ITMO, OIS i NTI

(72) Inventor(s):
Plotnikov Mikhail Yurevich (RU),
Volkov Anton Valerevich (RU)

(73) Proprietor(s):
federalnoe gosudarstvennoe avtonomnoe obrazovatelnoe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya "Natsionalnyj issledovatelskij universitet ITMO" (Universitet ITMO) (RU)

(54) METHOD OF MEASURING PHASE SIGNAL OF DOUBLE-BEAM FIBRE-OPTIC INTERFEROMETER

(57) Abstract:

FIELD: optics.

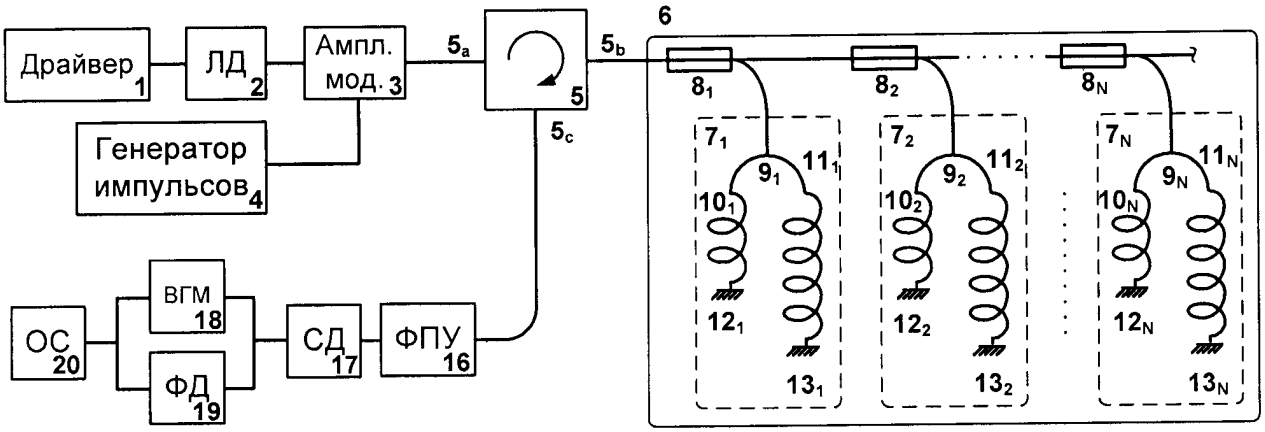
SUBSTANCE: invention relates to the field of fibre-optic measuring instruments and can be used to increase the accuracy of measuring a phase signal in two-beam Michelson or Mach-Zehnder interferometers and arrays of fibre-optic sensors based thereon. Method of measuring phase signal of double-beam interferometer includes generation of modulated optical signal by means of frequency modulation of optical radiation source, frequency-modulated optical signal is additionally modulated by amplitude using an amplitude modulator by feeding thereon rectangular electric pulses of constant porosity and the same amplitude and sending it to double-beam fibre-optic unbalanced interferometers - one reference and one or N-1 measuring, where N is the maximum number of double-beam fibre-optic interferometers combined into an array with time multiplexing in accordance with the optical budget of the optical circuit (N = 2, 3, 4, …), output frequency-modulated optical signals from fibre-optic interferometers are detected by photoreceiving devices performing their photoelectric conversion, the obtained electrical signals of each interferometer are converted by means of synchronous detection into sets of quadrature signals - sine and cosine signal components, using them determine the depth of frequency modulation of the signal of each interferometer, perform phase demodulation of quadrature signals of each interferometer and obtaining the desired phase signal of each measuring interferometer by subtracting the demodulated phase signal of the reference interferometer, multiplied by the ratio of the measured depth of frequency modulation in the measuring interferometer and the reference interferometer, from the demodulated phase signal of the measuring interferometer.

EFFECT: technical result is higher accuracy.

1 cl, 3 dwg

RU 2719635 C1

RU 2719635 C1



Фиг. 1

RU 2719635 C1

RU 2719635 C1

Изобретение относится к области волоконно-оптических измерительных приборов и может быть использовано для повышения точности измерения фазового сигнала в двухлучевых интерферометрах Майкельсона или Маха-Цендера и массивах волоконно-оптических датчиков на их основе.

Известен способ измерения фазовых сигналов двухлучевого волоконно-оптического интерферометра [статья Anthony Dandridge «Zero path-length difference in fiber-optic interferometers» Journal of Lightwave Technology, Vol. 1 Iss 3, p 514-516, September 1983]. Способ заключается в следующем. Лазерный диод генерирует оптическое излучение, которое поступает в двухлучевой волоконно-оптический интерферометр, интерференционный сигнал которого пропорционален разности фаз оптических лучей в плечах интерферометра в соответствии с известным выражением:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2}\cos(\Delta\varphi) \qquad (1)$$

где разность фаз оптических лучей в плечах интерферометра определяется как:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi n_{эфф}}{\lambda}\Delta L \qquad (2)$$

В выражениях (1) и (2) I -интерференционный сигнал, I_1 и I_2 - интенсивности оптических лучей в плечах интерферометра, Δφ - разность фаз оптического излучения в плечах интерферометра, λ - длина волны оптического излучения, $n_{эфф}$ - эффективный показатель преломления оптического волокна, ΔL - разность длин плеч интерферометра.

Выражение (2) может быть представлено в виде:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi n_{эфф}\nu}{c}\Delta L \qquad (3)$$

где c - скорость света в вакууме, ν - частота источника оптического излучения, ΔL - разность длин плеч интерферометра.

В соответствии с выражением (3) естественное смещение (нестабильность) частоты ν источника оптического излучения dν приводит к флуктуациям разности фаз оптических лучей (фазовому шуму) в волоконно-оптическом интерферометре в соответствии со следующим выражением:

$$d\varphi = \frac{2\pi n_{эфф} d\nu}{c}\Delta L \qquad (4)$$

где dφ - фазовый шум источника оптического излучения, обусловленный нестабильностью оптической частоты $d\nu$ источника оптического излучения.

Повышение точности измерения фазовых сигналов двухлучевого интерферометра достигается за счет устранения фазовых шумов источника оптического излучения путем уменьшения разности длин плеч интерферометра ΔL. При этом в соответствии с выражением (4) величина фазового шума dφ, обусловленного нестабильностью источника оптического излучения, стремится к нулю при нулевой разности длин плеч интерферометра ΔL.

Недостатками известного способа являются необходимость точного согласования длин плеч двухлучевого волоконно-оптического интерферометра для подавления фазовых шумов источника оптического излучения и повышения точности измерений фазовых сигналов, а также неполное подавление фазовых шумов источника оптического излучения за счет изменения разницы длин плеч двухлучевого волоконно-оптического интерферометра под действием внешних условий (температуры, давления).

Известен способ измерения фазовых сигналов двухлучевого волоконно-оптического интерферометра, выбранный в качестве прототипа [Патент США №5227857, кл. 356/

345 (G01B 9/02), дата публ. 13.07.1993].

Способ заключается в следующем: производится формирование частотно-модулированного оптического сигнала с помощью частотной модуляции источника оптического излучения. Частотно-модулированный оптический сигнал заводится в два двухлучевых волоконно-оптических разбалансированных интерферометра - опорный и измерительный. Опорный интерферометр изолирован от воздействия измеряемой физической величины. Оба интерферометра имеют одинаковую разность длин плеч. Выходные частотно-модулированные оптические сигналы с обоих интерферометров заводятся на фотоприемные устройства, осуществляющие их регистрацию путем фотоэлектрического преобразования. Получившиеся электрические сигналы каждого интерферометра преобразуются посредством синхронного детектирования в наборы квадратурных сигналов - синусных и косинусных сигнальных компонент. Искомый фазовый сигнал измерительного интерферометра формируется из синусных и косинусных сигнальных компонент опорного и измерительного интерферометров, посредством их фазовой демодуляции и вычитания демодулированного фазового сигнала опорного интерферометра из демодулированного фазового сигнала измерительного интерферометра. За счет того, что оба интерферометра имеют одинаковую разность длин плеч, фазовый шум, обусловленный нестабильностью источника оптического излучения, устраняется при вычитании фазовых сигналов опорного и измерительного интерферометров при условии равенства разниц длин плеч опорного и измерительного интерферометров.

Недостатками известного способа является трудность обеспечения одинаковой разницы длин плеч в опорном и измерительном двухлучевых волоконно-оптических интерферометрах, невозможность использования способа для повышения точности измерения фазовых сигналов в массивах двухлучевых интерферометров, а также низкая эффективность известного способа из-за неодинакового изменения разниц длин плеч опорного и измерительного интерферометров под действием внешних условий (температуры, давления).

Способ решает задачу повышения точности измерения фазового сигнала в одном или нескольких двухлучевых волоконно-оптических измерительных интерферометрах, объединенных в массив с мультиплексированием по времени, независимо от разницы длин плеч в опорном и измерительных волоконно-оптических интерферометрах за счет устранения фазовых шумов источника оптического излучения.

Поставленная задача решается следующим образом.

В способе измерения фазовых сигналов двухлучевого интерферометра, включающем формирование модулированного оптического сигнала с помощью частотной модуляции источника оптического излучения, частотно-модулированный оптический сигнал дополнительно модулируют по амплитуде с помощью амплитудного модулятора путем подачи на него прямоугольных электрических импульсов постоянной скважности и одинаковой амплитуды и направляют его в двухлучевые волоконно-оптические разбалансированные интерферометры - один опорный и один или N-1 измерительных, где N - максимальное число двухлучевых волоконно-оптических интерферометров, объединенных в массив с мультиплексированием по времени в соответствии с оптическим бюджетом оптической схемы (N=2, 3, 4, …), выходные частотно-модулированные оптические сигналы с волоконно-оптических интерферометров регистрируют с помощью фотоприемных устройств, выполняющих их фотоэлектрическое преобразование, получившиеся электрические сигналы каждого интерферометра преобразуют посредством синхронного детектирования в наборы квадратурных сигналов - синусных

и косинусных сигнальных компонент, с их помощью определяют глубину частотной модуляции сигнала каждого интерферометра, осуществляют фазовую демодуляцию квадратурных сигналов каждого интерферометра и получают искомый фазовый сигнал каждого измерительного интерферометра путем вычитания демодулированного фазового сигнала опорного интерферометра, умноженного на отношение измеренных глубин частотной модуляции в измерительном интерферометре и опорном интерферометре, из демодулированного фазового сигнала измерительного интерферометра.

Сущность заявляемого изобретения поясняется следующим.

Драйвер обеспечивает электрическую накачку постоянным и переменным током лазерного диода, который генерирует постоянное оптическое излучение, модулированное по частоте в диапазоне от сотни герц до нескольких десятков килогерц. На лазерный диод подается электрический гармонический сигнал, что приводит к изменению генерируемой лазером частоты, пропорционально подаваемому электрическому сигналу. Функция изменения частоты лазерного диода может быть выражена как:

$$\nu(t) = \Delta\nu_{MAX}\cos(2\pi f_{МОД}t), \qquad (5)$$

где $\Delta\nu_{MAX}$ - максимальное изменение частоты лазерного диода, $f_{мод}$ - частота модуляции лазерного диода, t - время.

Оптическое излучение от лазерного диода попадает на амплитудный модулятор, который формирует оптические импульсы. Работой амплитудного модулятора управляет генератор импульсов, который подает на амплитудный модулятор прямоугольные электрические импульсы постоянной скважности и одинаковой амплитуды. Оптические импульсы по своей форме повторяют электрические импульсы. Таким образом, с выхода амплитудного модулятора на вход оптической схемы поступают оптические импульсы с постоянной скважностью и амплитудой, модулированные по частоте.

Оптическая схема представляет собой N двухлучевых разбалансированных волоконно-оптических интерферометров - один опорный и один или N-1 измерительных (N=2, 3, 4…), интерферометры объединены в массив с мультиплексированием по времени. Опорный интерферометр изолирован от воздействия измеряемой физической величины. Количество волоконно-оптических двухлучевых интерферометров N в массиве определяется оптическим бюджетом оптической схемы массива волоконно-оптических интерферометров, который определяется мощностью используемого в оптической схеме лазерного диода и пороговой чувствительностью фотоприемного устройства, где под пороговой чувствительностью фотоприемного устройства понимается минимальный уровень мощности оптического сигнала, при котором обеспечивается равенство средних мощностей сигнала и шума на выходе фотоприемного устройства. Оптический бюджет оптической схемы массива двухлучевых волоконно-оптических интерферометров не должен превышать разности между мощностью используемого лазерного диода и пороговой чувствительностью фотоприемного устройства, что является необходимым и достаточным условием для регистрации на фотоприемном устройстве оптических импульсов от каждого волоконно-оптического интерферометра исследуемого массива двухлучевых волоконно-оптических интерферометров с уровнем сигнала, превышающим пороговую чувствительность фотоприемного устройства.

Каждый двухлучевой волоконно-оптический интерферометр в оптической схеме имеет два плеча, одно из которых является опорным, а второе - чувствительным. Разница длин оптических волокон в плечах интерферометра равна ΔL.

Оптические импульсы, модулированные по частоте, попадают в каждый из массива двухлучевых разбалансированных волоконно-оптических интерферометров, и разделяются в каждом интерферометре с помощью волоконно-оптического разветвителя на два одинаковых по интенсивности оптических импульса, распространяющихся по плечам интерферометра. После прохождения плеч интерферометра оптические импульсы объединяются с помощью волоконно-оптического разветвителя и формируют интерференционный оптический импульс, пропорциональный разности фаз оптических лучей в плечах интерферометра, в соответствии выражением:

$$I(t) = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2}\cos(\Delta\varphi(t)) \qquad (6)$$

где I(t) - интенсивность интерференционного оптического импульса с интерферометра в момент времени t, I_1 и I_2 - интенсивности оптических лучей в плечах интерферометра, $\Delta\varphi(t)$ - разность фаз оптических лучей в плечах интерферометра в момент времени t, которая определяется как:

$$\Delta\varphi(t) = \varphi_{МОД}(t) + \varphi_{ШУМ}(t) + \varphi_{СИГ}(t) \qquad (7)$$

где $\varphi_{мод}(t)$ - сигнал частотной модуляции источника оптического излучения, $\varphi_{ШУМ}(t)$ - фазовый шум источника оптического излучения, $\varphi_{СИГ}(t)$ - искомый измеряемый фазовый сигнал, обусловленный воздействием на измерительный интерферометр измеряемой физической величины (отсутствует в опорном интерферометре). При этом в соответствии с выражениями (3), (4) и (5) сигнал частотной модуляции источника оптического излучения и фазовый шум источника оптического излучения определяются выражениями:

$$\varphi_{МОД}(t) = \frac{2\pi n_{эфф}\Delta\nu_{MAX}}{c}\Delta L\cos(2\pi f_{МОД}t) = C\cos(2\pi f_{МОД}t) \qquad (8)$$

$$\varphi_{ШУМ}(t) = \frac{2\pi n_{эфф}d\nu(t)}{c}\Delta L \qquad (9)$$

В выражениях (8) и (9) $n_{эфф}$ - эффективный показатель преломления оптического волокна, c - скорость света в вакууме, ΔL - разность длин плеч интерферометра, $\Delta\nu_{MAX}$ - максимальное изменение частоты лазерного диода, $f_{мод}$ - частота модуляции лазерного диода, $d\nu(t)$ - естественное смещение (нестабильность) частоты источника оптического излучения (фазовый шум) в момент времени t, а величина $C = \frac{2\pi n_{эфф}\Delta\nu_{MAX}}{c}\Delta L$ является глубиной частотной модуляции источника оптического излучения в двухлучевом волоконно-оптическом интерферометре.

Согласно выражениям (8) и (9) глубина частотной модуляции источника оптического излучения и величина фазовых шумов источника оптического излучения пропорциональны разности длин плеч двухлучевого волоконно-оптического интерферометра ΔL.

Интерференционный импульс с интенсивностью I (6) попадает на фотоприемное устройство, которое осуществляет его регистрацию и преобразование в электрическую форму. Электрический интерференционный сигнал интерферометра с учетом выражений (7) и (8) имеет следующий вид:

$$I_{ЭЛ} = \eta(I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2}\cos(C\cos(2\pi f_{МОД}t) + \varphi_{ШУМ}(t) + \varphi_{СИГ}(t)) \qquad (10)$$

где $C = \frac{2\pi n_{эфф} \Delta \nu_{МАХ}}{c} \Delta L$ - глубина частотной модуляции источника оптического излучения, η - коэффициент преобразования оптического сигнала в электрический сигнал. Интерференционный электрический сигнал (10) может быть описан следующим выражением с использованием функций Бесселя:

$$\begin{aligned} I_{ЭЛ} &= -2\eta\sqrt{I_1 I_2} J_1(C)\cos(2\pi f_{МОД} t)\sin(\varphi_{ШУМ}(t) + \varphi_{СИГ}(t)) - \\ &- 2\eta\sqrt{I_1 I_2} J_2(C)\cos(2\pi 2 f_{МОД} t)\cos(\varphi_{ШУМ}(t) + \varphi_{СИГ}(t)) + \\ &+ 2\eta\sqrt{I_1 I_2} J_3(C)\cos(2\pi 3 f_{МОД} t)\sin(\varphi_{ШУМ}(t) + \varphi_{СИГ}(t)) + \\ &+ 2\eta\sqrt{I_1 I_2} J_4(C)\cos(2\pi 4 f_{МОД} t)\cos(\varphi_{ШУМ}(t) + \varphi_{СИГ}(t)) \end{aligned} \quad (11)$$

где $J_1(C)$, $J_2(C)$, $J_3(C)$, $J_4(C)$ - функции Бесселя первого рода первого, второго, третьего и четвертого порядков от глубины частотной модуляции, соответственно.

Из сигнала (11) посредством синхронного детектирования формируют набор квадратурных сигналов - косинусных и синусных сигнальных компонент для сигнала с каждого интерферометра:

$$S_1(t) = -\eta\sqrt{I_1 I_2} J_1(C)\sin(\varphi_{ШУМ}(t) + \varphi_{СИГ}(t)) \quad (12)$$

$$S_2(t) = -\eta\sqrt{I_1 I_2} J_2(C)\cos(\varphi_{ШУМ}(t) + \varphi_{СИГ}(t)) \quad (13)$$

$$S_3(t) = -\eta\sqrt{I_1 I_2} J_3(C)\sin(\varphi_{ШУМ}(t) + \varphi_{СИГ}(t)) \quad (14)$$

$$S_4(t) = -\eta\sqrt{I_1 I_2} J_4(C)\cos(\varphi_{ШУМ}(t) + \varphi_{СИГ}(t)) \quad (15)$$

С использованием квадратурных сигналов (12)-(15) и рекуррентных свойств функций Бесселя известным способом определяют глубину частотной модуляции сигнала с каждого интерферометра:

$$C = \sqrt{\frac{-24 S_2(t) S_3(t)}{(S_3(t) - S_2(t))(S_4(t) - S_2(t))}} \quad (16)$$

В результате получают значения глубин частотной модуляции для опорного $C_{оп}$ и для каждого измерительного двухлучевых интерферометров C_{N-1}.

Затем известным способом производят фазовую демодуляцию квадратурных сигналов со всех двухлучевых интерферометров. В результате на выходе фазового демодулятора получают демодулированные фазовые сигналы с каждого интерферометра, которые можно представить в виде:

$$\varphi_{ОП}(t) = \varphi_{ШУМ\ ОП}(t), \quad (17)$$

$$\varphi_{ИЗМ\ N-1}(t) = \varphi_{ШУМ\ N-1}(t) + \varphi_{СИГ\ N-1}(t), \quad (18)$$

где $\phi_{ОП}(t)$ и $\phi_{ИЗМ\ N-1}(t)$ - демодулированные фазовые сигналы с опорного и N-1 измерительного интерферометров, $\phi_{ШУМ\ ОП}(t)$ и $\phi_{ШУМ\ N-1}(t)$ - фазовые шумы источника оптического излучения в опорном и измерительном интерферометрах, а $\phi_{СИГ\ N-1}(t)$ - искомый фазовый сигнал N-1 измерительного интерферометра. Измеряемый фазовый сигнал $\phi_{СИГ}(t)$ в опорном интерферометре отсутствует, поскольку он изолирован от воздействия измеряемой величины, а величина фазового шума источника оптического

излучения $\phi_{ШУМN}(t)$ в каждом интерферометре N прямо пропорциональна разнице его длин плеч ΔL_N в соответствии с выражением (9).

Искомый фазовый сигнал $\phi_{СИГ\ N-1}(t)$ каждого измерительного интерферометра N-1 получают в соответствии с выражением:

$$\varphi_{сиг\ N-1}(t) = \varphi_{изм\ N-1}(t) - \varphi_{оп}(t)\frac{C_{N-1}}{C_{оп}}, \qquad (19)$$

где C_{N-1} - глубина частотной модуляции в N-1 измерительном интерферометре, $C_{ОП}$ - глубина частотной модуляции в опорном интерферометре, $\phi_{ИЗМ\ N-1}(t)$ - демодулированный фазовый сигнал N-1 измерительного интерферометра в соответствии с выражением (18), $\phi_{ОП}(t)$ - демодулированный фазовый сигнал опорного интерферометра в соответствии с выражением (17).

Поскольку в соответствии с выражением (8) глубина частотной модуляции в каждом интерферометре пропорциональна разнице длин его плеч, отношение глубин частотной модуляции измерительного и опорного интерферометров $C_{N-1}/C_{ОП}$ равно отношению их разниц длин плеч $\Delta L_{N-1}/\Delta L_{ОП}$. Таким образом, умножение демодулированного фазового сигнала опорного интерферометра (17), содержащего только фазовый шум источника оптического излучения, на отношение разниц длин плеч измерительного и опорного интерферометров позволяет определить величину фазового шума в демодулированном фазовом сигнале измерительного интерферометра (18) в соответствии с выражением:

$$\varphi_{шум\ N-1}(t) = \varphi_{оп}(t)\frac{C_{N-1}}{C_{оп}} = \varphi_{оп}(t)\frac{L_{N-1}}{L_{оп}}, \qquad (20)$$

В результате, вычитание сигнала (20) из демодулированного сигнала измерительного интерферометра (18) позволяет получить искомый фазовый сигнал $\phi_{СИГ\ N-1}(t)$, содержащий фазовых шумов источника оптического излучения.

Таким образом, заявляемый способ обеспечивает повышение точности измерения фазового сигнала в одном или нескольких двухлучевых волоконно-оптических измерительных интерферометрах, объединенных в массив с мультиплексированием по времени, независимо от разницы длин плеч в опорном и измерительных волоконно-оптических интерферометрах за счет устранения фазовых шумов источника оптического излучения.

Сущность заявляемого способа поясняется чертежами.

На фиг. 1 показана структурная схема системы, состоящей из лазерного диода, N разбалансированных волоконно-оптических двухлучевых интерферометров, объединенных в массив с мультиплексированием по времени, и системы приема и обработки сигналов с интерферометров.

На фиг. 2 показаны оптические импульсы в оптической схеме массива двухлучевых волоконно-оптических интерферометров.

На фиг. 3 показаны искомый фазовый сигнал, демодулированный фазовый сигнал с двухлучевого измерительного интерферометра и демодулированный фазовый сигнал с двухлучевого опорного интерферометра, указано соотношение глубин частотной модуляции в опорном и измерительном интерферометрах.

Заявляемый способ может быть осуществлен с помощью устройства, представленного на фиг. 1. Устройство содержит драйвер 1, представляющий собой электрическую схему источника переменного и постоянного тока, выход которого электрически соединен с

входом лазерного диода 2, представляющего собой полупроводниковый лазерный источник оптического излучения, снабженный волоконно-оптическим выводом. Лазерный диод 2 с помощью волоконно-оптического вывода оптически соединен с амплитудным модулятором 3, который представляет собой электрооптическое устройство, управляемое внешним электрическим сигналом. Генератор импульсов 4 электрически соединен с амплитудным модулятором 3. Амплитудный модулятор оптически соединен с портом 5a волоконно-оптического циркулятора 5. Волоконно-оптический циркулятор 5 через порт 5b оптически соединен с массивом разбалансированных двухлучевых волоконно-оптических интерферометров 6. Массив интерферометров 6 состоит из N волоконно-оптических интерферометров от 7_1 до 7_N (двухлучевые разбалансированные волоконно-оптические интерферометры Майкельсона). Все интерферометры оптически соединены между собой волоконно-оптическими Y-разветвителями 8_1-8_N. Каждый волоконно-оптический интерферометр 7_1-7_N состоит из волоконно-оптического Y-разветвителя 9_1-9_N, каждый из которых имеет 2 плеча: опорное 10_1-10_N и чувствительное 11_1-11_N. На торце оптического волокна, формирующего опорное плечо 10_1-10_N, сформировано светоотражающее зеркало 12_1-12_N. На торце оптического волокна, формирующего чувствительное плечо 11_1-11_N, сформировано светоотражающее зеркало 13_1-13_N. Выходной порт 5c волоконно-оптического циркулятора 5 соединен оптически с фотоприемным устройством 16 (ФПУ). ФПУ 16 электрически соединено с синхронным детектором 17 (СД). СД 17 электрически соединен с блоком вычисления глубины модуляции 18 (ВГМ). ВГМ 18 электрически соединен с фазовым демодулятором 19 (ФД). ФД 19 электрически соединен с блоком обработки сигналов 20 (ОС).

Заявляемый способ осуществляется следующим образом. Драйвер формирует электрический гармонический сигнал с постоянным положительным смещением и подает его на лазерный диод 2. Лазерный диод 2 генерирует постоянное оптическое излучение, модулированное по частоте, которое поступает на вход амплитудного модулятора 3. Генератор импульсов 4 управляет амплитудным модулятором 3 путем подачи на него следующих периодически прямоугольных электрических импульсов с постоянной амплитудой и скважностью. В результате, в каждый момент времени, когда на амплитудный модулятор 3 приходит прямоугольный электрический импульс, амплитудный модулятор 3 пропускает оптическое излучение от лазерного диода 2. В каждый момент времени, когда на амплитудный модулятор 3 не приходит прямоугольный электрический импульс, амплитудный модулятор 3 не пропускает оптическое излучение от лазерного диода 2. Таким образом, амплитудный модулятор 3 формирует периодически следующие оптические импульсы, которые совпадают по форме и скважности с теми, что формирует генератор импульсов 4. Оптические импульсы попадают на порт 5a волоконно-оптического циркулятора 5. Волоконно-оптический циркулятор 5 работает следующим образом: порт 5a пропускает оптический сигнал только в порт 5b (только по направлению от 5a к 5b), порт 5b пропускает оптический сигнал только в порт 5c (только по направлению от 5b к 5c).

Оптический импульс следует из порта 5b волоконно-оптического циркулятора 5, попадает в массив волоконно-оптических интерферометров 6, затем попадет в волоконно-оптический Y-разветвитель 8_1, в котором разделяется на два импульса: один импульс попадает в волоконно-оптический интерферометр 7_1, другой оптический импульс попадает в волоконно-оптический Y-разветвитель 8_2, где также делится на

два оптических импульса. В итоге, каждый оптический импульс, попадающий в массив волоконно-оптических датчиков 6, поэтапно делится на N импульсов с помощью N волоконно-оптических Y-разветвителей 8_1-8_N и попадает в N волоконно-оптических интерферометров 7_1-7_N. Один из выходов последнего Y-разветвителя 8_N, не соединенного оптически с интерферометром 7_N, терминирован - т.е. не дает обратных оптических отражений.

Каждый из двухлучевых волоконно-оптических интерферометров 7_1-7_N работает одинаково оптически, но один из интерферометров 7_1-7_N не подвергается воздействиям измеряемой величины и является опорным, а остальные интерферометры являются измерительными и подвергаются воздействию измеряемой величины. Выбор опорного интерферометра обусловлен удобством его изоляции от воздействий измеряемой величины, а сама изоляция опорного интерферометра от воздействия измеряемой величины осуществляется с помощью пространственного разнесения опорного и измерительных интерферометров. Наиболее удобным выбором в качестве опорного интерферометра является интерферометр 7_1, поскольку он является первым в массиве 6, и его удобней всего расположить в непосредственной близости от источника оптического излучения 2 и амплитудного модулятора 3, которые располагаются в отдельном изолированном корпусе.

Описание принципа работы интерферометров проводится на основе первого волоконно-оптического интерферометра 7_1 из массива волоконно-оптических интерферометров 6. Остальные интерферометры в массиве 6 работают аналогично. В волоконно-оптическом интерферометре 7_1 оптический импульс, проходя через волоконно-оптический Y-разветвитель 9_1, делится на два одинаковых оптических импульса. Один оптический импульс попадает в опорное плечо 10_1, проходит по нему, отражается от светоотражающего зеркала 12_1, попадет обратно в волоконно-оптический Y-разветвитель 9_1. Второй оптический импульс попадает в чувствительное плечо 11_1, проходит по нему, отражается от светоотражающего зеркала 13_1 и попадает обратно в волоконно-оптический Y-разветвитель 9_1. В волоконно-оптическом Y-разветвителе 9_1 оптические импульсы из разных плеч интерферометра интерферируют, результате чего получается один интерференционный импульс. Интерференционный импульс проходит через волоконно-оптический Y-разветвитель 8_1, попадает в порт 5_b волоконно-оптического циркулятора 5, проходит по нему и попадает на ФПУ 16. В результате на ФПУ 16 попадают N интерференционных оптических импульсов, по одному от каждого волоконно-оптического интерферометра 7_1-7_N. ФПУ 16 производит преобразование оптических интерференционных импульсов в электрическую форму. Затем электрические интерференционные импульсы попадают в синхронный детектор (СД) 17, который осуществляет их обработку, формируя набор электрических квадратурных сигналов - косинусных и синусных сигнальных компонент для электрического сигнала с каждого интерферометра. Далее наборы косинусных и синусных сигнальных компонент попадают в вычислитель глубины модуляции (ВГМ) 18, который определяет глубину частотной модуляции в каждом интерферометре и отношение глубины частотной модуляции в каждом измерительном интерферометре к глубине частотной модуляции в опорном интерферометре, и в фазовый демодулятор (ФД) 19, который осуществляют фазовую демодуляцию квадратурных сигналов с каждого интерферометра. Далее

сигналы с ВГМ 18 и ФД 19 попадают в блок обработки сигналов (ОС) 20, который производит вычитание демодулированного фазового сигнала опорного интерферометра из демодулированных фазовых сигналов измерительных интерферометров, предварительно умножив демодулированный фазовый сигнал опорного интерферометра на отношение измеренных глубин частотной модуляции в соответствующем измерительном интерферометре и опорном интерферометре, преобразуя их в искомые фазовые сигналы, пропорциональные измеряемому воздействию на измерительные интерферометры.

В качестве конкретного примера предлагается способ измерения фазового сигнала двухлучевого интерферометра, в котором в качестве массива волоконно-оптических интерферометров выступает массив из 8 двухлучевых разбалансированных волоконно-оптических интерферометров Майкельсона, мультиплексированных по времени.

В качестве лазерного диода выступает поверхностно-излучающий лазер с вертикальным резонатором (VCSEL). Драйвер - источник постоянного и переменного тока подает на VCSEL синусоидальный электрический сигнал частотой 50 кГц с постоянным положительным смещением, в результате чего VCSEL генерирует частотно-модулированный оптический сигнал. В качестве амплитудного модулятора выступает электрооптический амплитудный модулятор, на который генератор импульсов подает прямоугольные электрические импульсы длительностью 10 не с периодом следования 1 мкс. С выхода модулятора в волоконно-оптический циркулятор попадают модулированные по частоте оптические импульсы длительностью 10 не, следующие с периодом 1 мкс. С выхода волоконно-оптического циркулятора оптические импульсы попадают в массив из 8 волоконно-оптических интерферометров Майкельсона. Первый волоконно-оптический интерферометр является опорным, располагается в корпусе вместе с лазерным диодом и амплитудным модулятором, и изолирован от воздействия измеряемого гидроакустического воздействия, в то время как остальные 7 волоконно-оптических интерферометров являются измерительными и регистрируют гидроакустические сигналы. Интерференционные оптические импульсы с массива волоконно-оптических интерферометров поступают на ФПУ, которое состоит из фотодиода с волоконным выводом PDI-40 и трансимпедансного усилителя ADA4817. Оптический бюджет исследуемого массива волоконно-оптических интерферометров составляет 36 дБ и не превышает разности в 40 дБ между мощностью лазерного диода VCSEL и пороговой чувствительностью фотоприемного устройства на основе фотодиода PDI-40 и трансимпедансного усилителя ADA4817.

Синхронный детектор (СД), вычислитель глубины модуляции (ВГМ), фазовый демодулятор (ФД) и блок обработки сигналов (ОС) представляет собой совокупность аналого-цифрового преобразователя АЦП, который преобразует аналоговый электрический сигнал с ФПУ в цифровую форму, и программируемой логической интегральной схемы ПЛИС, в которой программно реализована обработка интерференционных сигналов в соответствии с описываемым способом.

На фиг. 3 представлен экспериментальный результат работы предлагаемого способа измерения фазового сигнала двухлучевого интерферометра: приведен демодулированный фазовый сигнал с опорного интерферометра, демодулированный фазовый сигнал с измерительного интерферометра и искомый фазовый сигнал измерительного интерферометра, полученный после подавления фазовых шумов источника оптического излучения предлагаемым способом. Также указано соотношение между глубинами частотной модуляции в опорном и измерительном интерферометрах. На фиг. 3 показано, что при вычитании демодулированного фазового сигнала опорного интерферометра,

предварительно умноженного на отношение измеренных глубин частотной модуляции в измерительном и опорном интерферометрах, из демодулированного фазового сигнала измерительного интерферометра достигается повышение точности измерения фазового сигнала в измерительном интерферометре путем подавления фазовых шумов источника оптического излучения.

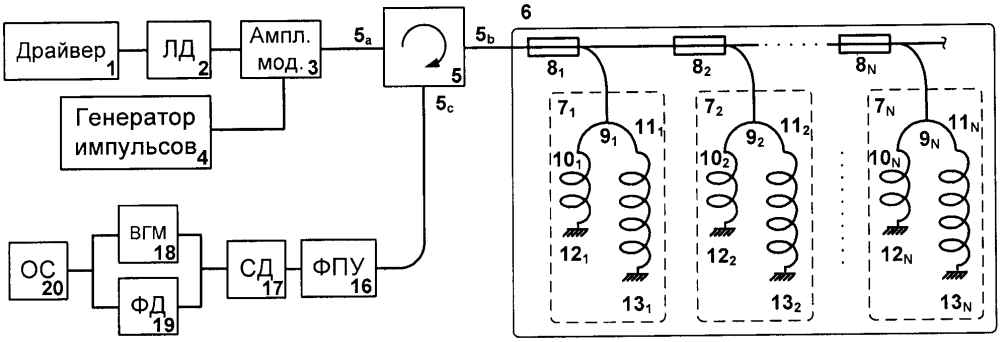
Таким образом, заявляемый способ измерения фазовых сигналов двухлучевого интерферометра обеспечивает повышения точности измерения фазового сигнала в одном или нескольких двухлучевых волоконно-оптических измерительных интерферометрах, объединенных в массив с мультиплексированием по времени, независимо от разницы длин плеч в опорном и измерительных волоконно-оптических интерферометрах за счет устранения фазовых шумов источника оптического излучения.

(57) Формула изобретения

Способ измерения фазового сигнала двухлучевого интерферометра, включающий формирование частотно-модулированного оптического сигнала путем частотной модуляции лазерного диода, направляемого в разбалансированные двухлучевые волоконно-оптические интерферометры, один из которых является опорным и изолирован от воздействия измеряемой физической величины, а другой - измерительным, регистрацию интерференционных сигналов опорного и измерительного интерферометров, их синхронное детектирование и фазовую демодуляцию, а искомый фазовый сигнал измерительного интерферометра получают путем вычитания демодулированного фазового сигнала опорного интерферометра из демодулированного фазового сигнала измерительного интерферометра, отличающийся тем, что предварительно частотно-модулированный оптический сигнал дополнительно модулируют по амплитуде с помощью амплитудного модулятора путем подачи на него прямоугольных электрических импульсов постоянной скважности и одинаковой амплитуды, а полученный оптический сигнал направляют в один или N-1 измерительных интерферометров, объединенных в массив с мультиплексированием по времени и измеряют глубину частотной модуляции C зарегистрированных интерференционных сигналов каждого интерферометра, а искомый фазовый сигнал каждого измерительного интерферометра $\phi_{снгN-1}$ получают в соответствии с выражением:

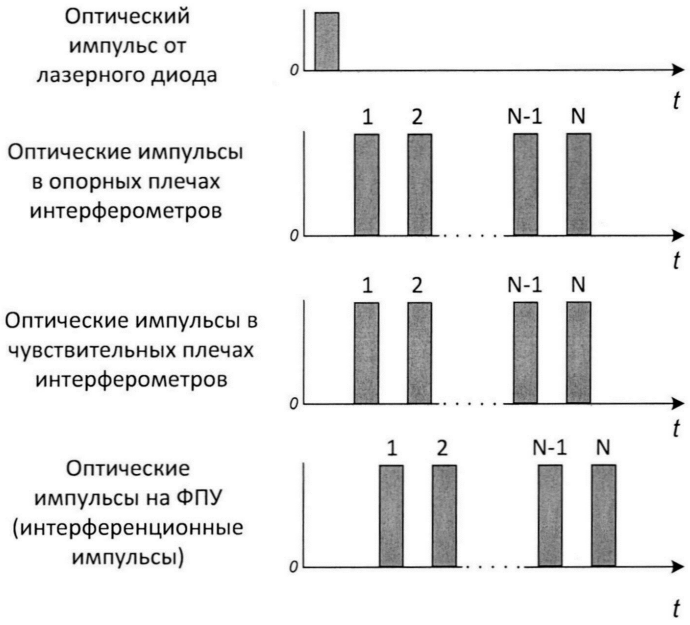
$\phi_{снгN-1}=\phi_{измN-1}-\phi_{оп}(C_{N-1}/C_{оп})$, где C_{N-1} - глубина частотной модуляции в N-1 измерительном интерферометре, $C_{оп}$ - глубина частотной модуляции в опорном интерферометре, $\phi_{измN-1}$ - демодулированный фазовый сигнал N-1 измерительного интерферометра, $\phi_{оп}$ - демодулированный фазовый сигнал опорного интерферометра, где N - общее число волоконно-оптических интерферометров в массиве, определяемое оптическим бюджетом оптической схемы массива волоконно-оптических интерферометров.

1


Драйвер 1
ЛД 2
Ампл. мод. 3
5a
5
5b
6
Генератор импульсов 4
5c
ОС 20
ВГМ 18
ФД 19
СД 17
ФПУ 16
8₁
8₂
8N
7₁
9₁
11₁
10₁
12₁
13₁
7₂
9₂
11₂
10₂
12₂
13₂
7N
9N
11N
10N
12N
13N

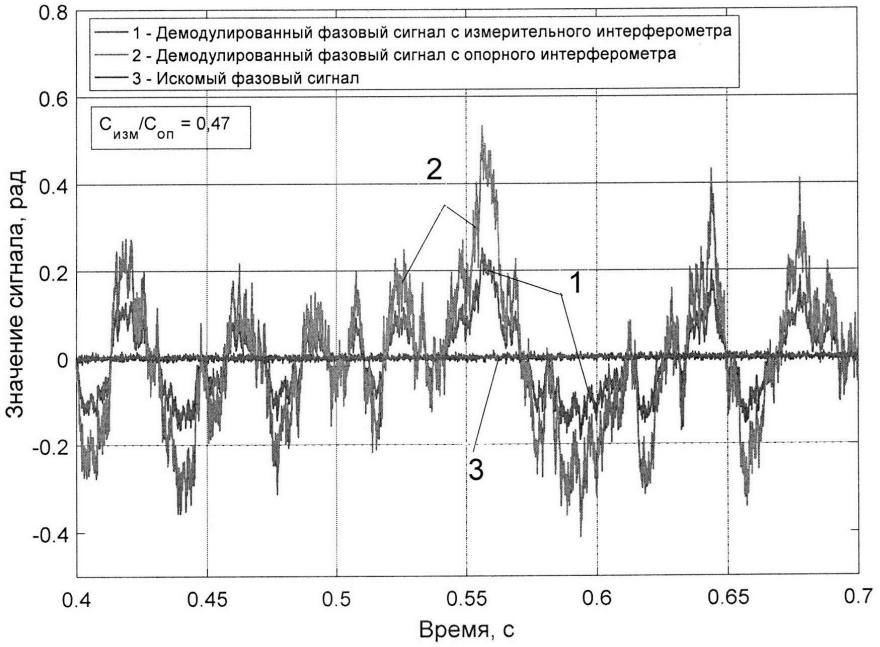
Фиг. 1

2


Оптический импульс от лазерного диода
0
t
Оптические импульсы в опорных плечах интерферометров
1
2
N-1
N
0
t
Оптические импульсы в чувствительных плечах интерферометров
1
2
N-1
N
0
t
Оптические импульсы на ФПУ (интерференционные импульсы)
1
2
N-1
N
0
t

Фиг. 2

3


1 - Демодулированный фазовый сигнал с измерительного интерферометра
2 - Демодулированный фазовый сигнал с опорного интерферометра
3 - Искомый фазовый сигнал
$C_{изм}/C_{оп}$ = 0,47
Значение сигнала, рад
Время, с
0.8
0.6
0.4
0.2
0
-0.2
-0.4
0.4
0.45
0.5
0.55
0.6
0.65
0.7
1
2
3

Фиг. 3