



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК

G01D 5/00 (2006.01)

(21)(22) Заявка: 2017105275, 17.02.2017

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
17.02.2017Дата регистрации:
17.04.2018

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 17.02.2017

(45) Опубликовано: 17.04.2018 Бюл. № 11

Адрес для переписки:

105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, стр. 1,
МГТУ им. Н.Э. Баумана, ЦЗИС, для Нестерова
Е.Т., НОЦ "Фотоника"

(72) Автор(ы):

Нестеров Евгений Тарасович (RU),
Пнёв Алексей Борисович (RU),
Киреев Андрей Владимирович (RU),
Степанов Константин Викторович (RU),
Жирнов Андрей Андреевич (RU),
Карасик Валерий Ефимович (RU),
Шелестов Дмитрий Алексеевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):

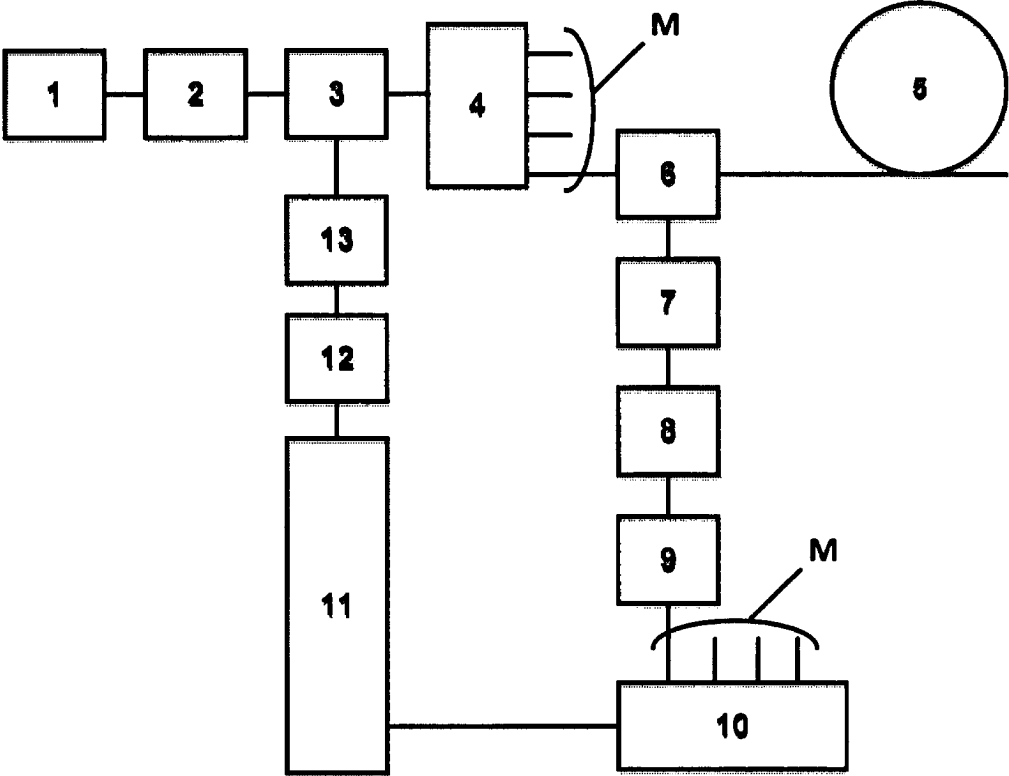
федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования "Московский государственный
технический университет имени Н.Э.
Баумана (национальный исследовательский
университет)" (МГТУ им. Н.Э. Баумана) (RU)(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: RU 5030 U1, 16.09.1997. RU 2437063
C1, 20.12.2011. RU 2498226 C1, 10.11.2013. RU
2503879 C1, 10.01.2014. US 8120775 B2,
21.02.2012.

(54) Волоконно-оптический распределительный виброакустический датчик на основе фазочувствительного рефлектометра и способ улучшения его характеристик чувствительности

(57) Реферат:

Изобретение относится к распределенным виброакустическим волоконно-оптическим сенсорным системам. Волоконно-оптический распределенный виброакустический датчик на основе фазочувствительного рефлектометра содержит узкополосный источник излучения, волоконно-оптический усилитель, усиливающий излучение источника, акустооптический модулятор, работающий в импульсном режиме и вносящий частотный сдвиг в оптическое излучение, волоконно-оптический разветвитель на М-каналов в случае $M > 1$, причем каждый канал состоит из оптического волокна, циркулятора и волоконно-оптического эрбиевого усилителя в приемной части канала, усилитель

узкополосного оптического фильтра и далее фотоприемный модуль с выходом на канал многоканального АЦП с количеством входов не менее числа задействованных каналов, таким образом, выходы всех каналов подсоединены к своим входам многоканального АЦП. На выходе АЦП последовательно установлены цифровой процессор формирования управляющих импульсов, управления, обработки и передачи данных, плата частотно-импульсного формирователя и драйвер АОМ; все волокна М-каналов проложены вдоль друг друга рядом. Технический результат заключается в увеличении чувствительности к слабым виброакустическим воздействиям на чувствительный элемент и в



Фиг.1



FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**

(52) CPC
G01D 5/00 (2006.01)

(21)(22) Application: **2017105275, 17.02.2017**

(24) Effective date for property rights:
17.02.2017

Registration date:
17.04.2018

Priority:

(22) Date of filing: **17.02.2017**

(45) Date of publication: **17.04.2018** Bull. № 11

Mail address:

**105005, Moskva, ul. 2-ya Baumanskaya, 5, str. 1,
MG TU im. N.E. Bauman, TSZIS, dlya Nesterova
E.T., NOTS "Fotonika"**

(72) Inventor(s):

**Nesterov Evgenij Tarasovich (RU),
Pnev Aleksej Borisovich (RU),
Kireev Andrej Vladimirovich (RU),
Stepanov Konstantin Viktorovich (RU),
Zhironov Andrej Andreevich (RU),
Karasik Valerij Efimovich (RU),
Shelestov Dmitrij Alekseevich (RU)**

(73) Proprietor(s):

**federalnoe gosudarstvennoe byudzhethnoe
obrazovatelnoe uchrezhdenie vysshego
obrazovaniya "Moskovskij gosudarstvennyj
tekhnicheskij universitet imeni N.E. Bauman
(natsionalnyj issledovatel'skij universitet)"
(MG TU im. N.E. Bauman) (RU)**

(54) **FIBER-OPTICAL DISTRIBUTION VIBROACOUSTIC SENSOR BASED ON PHASE-SENSITIVE REFLECTOMETER AND METHOD OF IMPROVING ITS CHARACTERISTICS OF SENSITIVITY**

(57) Abstract:

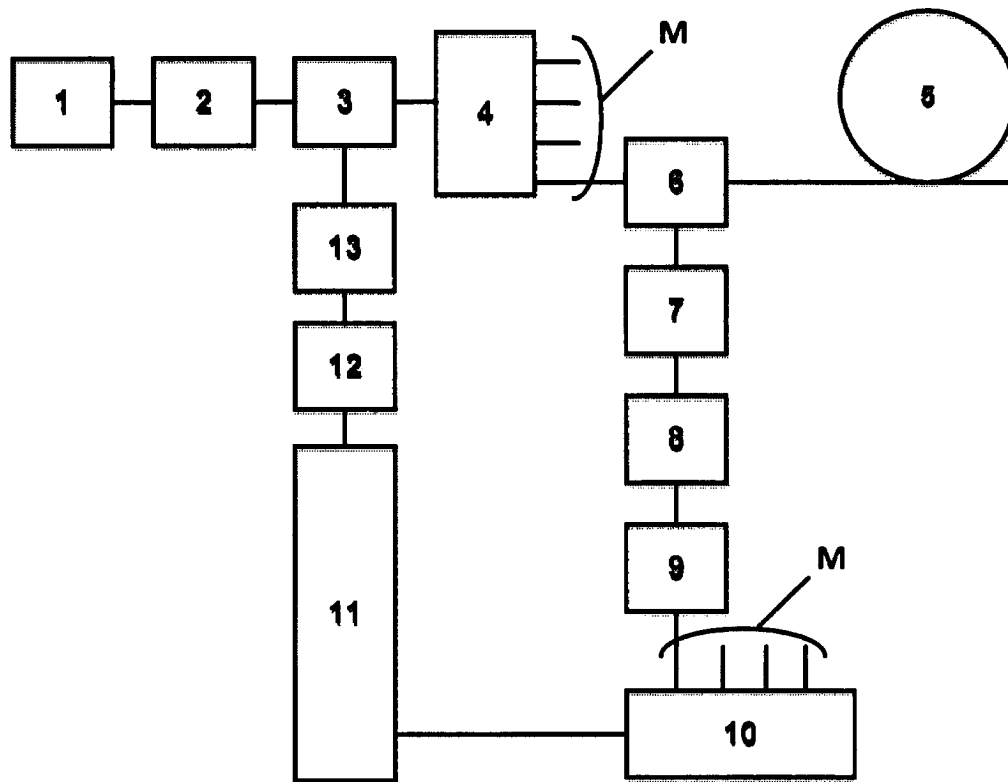
FIELD: measurement.

SUBSTANCE: invention relates to distributed vibro-acoustic fiber-optic sensor systems. A fiber-optic distributed vibro-acoustic sensor based on phase-sensitive reflectometer contains narrow-band radiation source, fiber-optic amplifier that amplifies source radiation, acoustic-optical modulator operating in pulsed mode and introducing frequency shift into optical radiation, fiber optic splitter on M channels in case of $M > 1$, each channel consisting of optical fiber, circulator and fiber optic erbium amplifier in receiving part of channel, amplifier of narrowband optical filter and further photodetector module with output to channel of

multichannel ADC with input quantity of not less than number of channels involved. Thus, outputs of all channels are connected to their inputs of multichannel ADC. At output of ADC, digital processor for generation of control pulses, controls, processing and transmission of data, board of frequency-pulse shaper and AOM driver; all fibers of M-channels are laid along each other side by side.

EFFECT: technical result consists in increasing sensitivity to weak vibroacoustic influences on sensor element and in increasing length of sensor sensitive element.

4 cl, 3 dwg



Фиг.1

Область техники

Изобретение относится к распределенным виброакустическим волоконно-оптическим сенсорным системам. Изобретение может быть использовано в системах мониторинга протяженных объектов, в системах охраны периметров, в системах каротажа нефтяных скважин, в системах контроля и диагностики железнодорожного транспорта, в системах мониторинга вибрации промышленных объектов.

Уровень техники

Принципы работы распределенных виброакустических волоконно-оптических систем основаны на методе фазочувствительной оптической рефлектометрии. Метод позволяет регистрировать изменения фазовых соотношений обратнорассеянного излучения. В отличие от широко распространенных методов некогерентной рефлектометрии, применяемых для диагностики повреждений оптических волокон, регистрация изменения фазовых соотношений обратнорассеянного сигнала становится возможна благодаря применению узкополосного источника излучения, из которого формируются сканирующие импульсы, вследствие чего обратнорассеянные волны складываются когерентно, с учетом фазовых соотношений. На изменение фазовых соотношений обратнорассеянных волн влияет изменение оптического пути. Оптический путь представляет собой произведение геометрического пути на показатель преломления оптического волокна. При вибрационном или акустическом воздействии на оптическое волокно изменяются как геометрическая длина, так и показатель преломления.

Сигналом является излучение обратного рассеяния от неоднородностей оптического волокна и в качестве датчика используется все оптическое волокно. Для выделения определенных участков волокна используются методы импульсной рефлектометрии, в которых пространственное разрешение определяется полушириной зондирующего оптического импульса, а временная задержка сигнала обратного рассеяния соответствует удаленности участка оптического волокна от места ввода зондирующего импульса. Термин «распределенный волоконно-оптический датчик» подразумевает использование всего оптического волокна в качестве датчика и при этом не требуется использование каких-либо специальных точечных датчиков.

Временная зависимость сигнала обратного рассеяния от единичного сканирующего импульса называется рефлектограммой. При отсутствии виброакустического воздействия на оптическое волокно, рефлектограммы от импульса к импульсу меняются на величину нестабильности компонентов оптической и электронной схемы прибора. Основной вклад, как правило, вносит нестабильность длины волны узкополосного источника излучения, а длина волны обратно пропорциональна частоте излучения ($\lambda = c/(n \cdot \nu)$, где λ - длина волны света, ν - частота излучения). В таком случае изменения от одной рефлектограммы к другой составляют доли процента. При наличии виброакустического воздействия на оптическое волокно в местах, где происходит воздействие, изменение от одной рефлектограммы к другой может составлять до 100%.

Регистрация виброакустических воздействий вышеуказанным методом предполагает размещение в зоне вибрационных воздействий волоконно-оптического кабеля. Оптическое волокно используется в качестве распределенного чувствительного элемента. В оптическое волокно посылаются короткие световые импульсы с периодом, большим или равным времени прохождения светом удвоенной оптической длины оптического волокна. Временная зависимость мощности обратнорассеянного излучения регистрируется при помощи фотодетектора, с которого сигнал поступает на аналого-цифровой преобразователь (АЦП). Оцифрованный сигнал подвергается цифровой обработке, в результате которой выделяются места виброакустического воздействия,

в зависимости от алгоритмов обработки могут определяться типы воздействий, их временные и спектральные характеристики.

Известен один из базовых патентов на изобретение в области устройств и метода когерентной рефлектометрии для регистрации виброакустических воздействий - патент США US 5194847 Apparatus and method for fiber optic intrusion sensing (МПК G01H 9/00; G01L 1/24; G01L 11/02; G08B 13/12; G08B 13/186; (IPC1-7): G08B 13/10; G08B 13/18, опублик. 1993-03-16), в котором описан распределенный волоконно-оптический датчик для обнаружения вибрационных воздействий на оптическое волокно. Базовому методу соответствуют базовые схемы устройств реализации метода, а также и множество производных схем устройств когерентной рефлектометрии. Дальнейшее развитие вариаций метода когерентной рефлектометрии, близких к предлагаемым решениям в данном патенте, отражено, например, в патенте США US 8248589 (B2) Phase Based Sensing (МПК G01N 21/00, опублик. 2012-08-21); патенте США US 8923663 (B2) Distributed Fibre Optic Sensing (МПК G01D 5/353; G02B 6/00, опублик. 2014-12-30).

К недостаткам работы оптико-электронных схем в указанных патентах относится неравномерная чувствительность распределенного волоконно-оптического датчика. Неравномерность чувствительности обусловлена случайным, статистическим характером сложения обратнорассеянных волн по фазе. В результате картина обратного рассеяния представляет неравномерную зависимость мощности излучения от расстояния вдоль оптического волокна. Неравномерность мощности обратнорассеянного излучения приводит к неравномерности чувствительности системы к виброакустическому воздействию на оптический кабель. Неравномерность достигает 100% с минимальными значениями мощности обратнорассеянного излучения, равными нулю. Период неравномерности соизмерим с половиной длительности сканирующего импульса.

Например, для импульсов длительностью в 40 метров (что соответствует длительности по времени 200 нс, исходя из соотношения $l_{\text{и}} = \frac{c}{n} \cdot \tau_{\text{и}}$, где $l_{\text{и}}$ - длительность импульса в метрах, c - скорость света в вакууме, n - показатель преломления кварца оптического волокна, $\tau_{\text{и}}$ - длительность импульса в секундах), период неравномерности может

составлять от 5 до 20 метров. Следует отметить, что требуется использование стабильного по частоте (или по центральной длине волны) источника излучения, что при отсутствии виброакустического воздействия на оптическое волокно обуславливает стабильную во времени зависимость мощности обратнорассеянного излучения от длины оптического волокна. Период времени, в течение которого распределение локальных минимумов и максимумов не изменяется, составляет десятки и сотни секунд.

Неравномерность чувствительности вдоль оптического волокна приводит к неравномерному отклику на виброакустическое воздействие. В случае применения такой системы для мониторинга вибраций от объектов, формирующих виброакустическое поле больше периода неравномерности чувствительности, отклик системы на единичное воздействие легко спутать с откликом на множественное воздействие. В случае мониторинга вибраций от объектов, формирующих виброакустическое поле меньше периода неравномерности чувствительности, существует вероятность, что отклика системы на такое воздействие не будет вообще.

В качестве ближайшего аналога (прототипа) предлагаемым техническим решением выбраны устройство и реализованный в нем способ, описанные в патенте РФ на изобретение №2562689 Распределенный датчик акустических и вибрационных воздействий (МПК G01D 5/353, G01H 9/00, опублик. 10.09.2015 г.). Распределенный датчик акустических и вибрационных воздействий содержит чувствительный элемент в виде

оптического волокна, находящегося в волоконно-оптическом кабеле, и оптически соединенный с волокном через интерфейс фазочувствительный оптический рефлектометр. Также датчик содержит соединенный с интерфейсом источник периодической последовательности оптических тестирующих сигналов, выполненный в виде последовательно оптически соединенных непрерывного лазера, акустооптического модулятора (АОМ) на бегущей акустической волне, и приемник рассеянного излучения. Указанный источник выполнен с возможностью формирования тестирующих сигналов в виде пары импульсов равной длительности с задержкой второго импульса относительно первого и периодически изменяемой разностью фаз оптической несущей волны второго импульса относительно фазы оптической несущей волны первого импульса.

Недостатками известного устройства прототипа являются сниженная и неравномерная чувствительность к виброакустическому воздействию и сравнительно малая дальность действия. В указанном устройстве оптический импульс формируется из излучения узкополосного источника малой мощности, а затем усиливается оптическим эрбиевым усилителем. Следствием такого решения является нестабильность формы импульса на выходе оптического эрбиевого усилителя, работающего в импульсном режиме. Кроме того, оптический эрбиевый усилитель, находящийся непосредственно перед входом в оптическую линию, испускает в нее излучение спонтанной эмиссии, что также приводит к дополнительной нестабильности сигнала обратного рассеяния, что, в свою очередь, приводит к уменьшению чувствительности системы.

В способе, реализованном в указанном устройстве прототипа, в линию оптического волокна посылают пачки из двух импульсов, причем второй импульс в пачке отличается по фазовой задержке радиочастотного сдвига, вносимого АОМ в оптический сигнал. Такая схема является критичной к фазовой неопределенности (джиттеру) задающих генераторов, формирующих сигналы, подаваемые на АОМ и на АЦП. Также эта схема критична к джиттеру электронной схемы, формирующей последовательность из двух импульсов, к джиттеру сигнала генератора, подаваемого на цифровую схему демодуляции. Как следствие, чувствительность к вибрационному воздействию устройства, описанного в патенте на изобретение РФ №2562689, оказывается в несколько раз хуже, чем у предлагаемого устройства.

Раскрытие изобретения

Задачей изобретения является улучшение характеристик чувствительности волоконно-оптического распределенного виброакустического датчика на основе фазочувствительного рефлектометра, а именно: уменьшение неравномерности чувствительности распределенной виброакустической системы вдоль оптического волокна на всем его протяжении и устранение так называемого «замирания сигнала» или «слепых зон» (зон нечувствительности).

Технический результат - существенное улучшение характеристик чувствительности, а именно увеличение равномерности чувствительности к виброакустическому воздействию на чувствительный элемент, увеличение чувствительности к слабым виброакустическим воздействиям на чувствительный элемент, существенное уменьшение вероятности возникновения замирания сигнала и, как следствие, улучшение чувствительности, возможность увеличения длины чувствительного элемента датчика.

Технический результат достигается за счет того, что распределенный волоконно-оптический виброакустический датчик большой протяженности для регистрации вибрационных воздействий акустического частотного диапазона включает в себя узкополосный источник излучения (обычно это лазер с шириной полосы менее 35 кГц),

волоконно-оптический усилитель, усиливающий излучение источника (обычно до мощности в 1 Вт), АОМ, работающий в импульсном режиме и вносящий частотный доплеровский сдвиг в оптическое излучение, волоконно-оптический разветвитель на М-каналов (если канал только один, то разветвитель не нужен), каждый канал состоит из чувствительного элемента - оптического волокна, циркулятора, волоконно-оптического эрбиевого усилителя в приемной части канала, после усилителя узкополосного оптического фильтра и далее фотоприемного модуля с выходом на канал М-канального АЦП. Выходы всех каналов подсоединены к модулю М-канального АЦП, на выходе которого последовательно друг за другом установлены цифровой процессор формирования управляющих импульсов, управления, обработки и передачи данных, плата частотно-импульсного формирователя и драйвер АОМ для регулирования работы АОМ. Все волокна М-каналов проложены рядом друг с другом.

Способ выравнивания характеристик чувствительности этого распределенного волоконно-оптического виброакустического датчика заключается в изменении частоты одиночных импульсов, посылаемых в чувствительный элемент - оптическое волокно. Длительность сканирующих импульсов составляет $T_{ИМ}=50-500$ нс. Ширина спектра импульсов в первом приближении определяется из соотношения $\Delta f_{ИМ} \cong 1/T_{ИМ}$, то есть диапазон $\Delta f_{ИМ}=20-2$ МГц. При этом ширина спектра рефлектограммы практически равна ширине спектра сканирующих импульсов $\Delta f_{ИМ} \cong \Delta f_{РЕФ}$, так как ширина спектра непрерывного излучения узкополосного источника излучения много меньше ширины спектра сканирующих импульсов $\Delta f_{ИСТ} \ll \Delta f_{ИМ}$ (обычно это лазер с шириной полосы менее 35 кГц). Центральная частота излучения зондирующих импульсов для оптической схемы датчика складывается из центральной частоты источника излучения и доплеровского увеличения частоты, вносимой АОМ. Изменение частоты излучения зондирующих импульсов на величину, большую $1/T_{ИМ}$ ($\Delta f_{СЧ} \leq 1/T_{ИМ}$), приводит к формированию новой статистической картины сигналов обратного рассеяния. В результате чего на участках волокна, на которых чувствительность была минимальна, характеристика чувствительности будет больше минимальной. От каждого импульса с определенной центральной частотой формируется рефлектограмма, статистически отличная от рефлектограммы, формируемой импульсом на другой центральной частоте, тем самым вероятность перекрытия «слепых зон» (зон нечувствительности) увеличивается в \sqrt{K} раз (где K - количество частот) после формирования комбинированной (составной) рефлектограммы, составленной из участков с максимальными чувствительностями отдельных рефлектограмм. Также возможно применение не одного, а нескольких чувствительных оптических волокон (проложенных рядом друг с другом) в М-каналах. Рефлектограммы оптических волокон каналов с принципиально отличными друг от друга характеристиками также имеют различные статистические характеристики, что в итоге после формирования из отдельных рефлектограмм комбинированной (составной) рефлектограммы увеличивает вероятность перекрытия «слепых зон» в \sqrt{N} раз, где $N=K*M$.

Таким образом, можно отметить следующие существенные отличия предлагаемого технического решения от прототипа:

1. АОМ, формирующий зондирующие импульсы, в предлагаемой схеме расположен после оптического эрбиевого усилителя, исключая излучение спонтанной эмиссии оптического усилителя в оптическую линию. Данное решение позволяет увеличить отношение сигнал/шум и тем самым увеличить чувствительность системы.

2. В оптическое волокно посылают одиночные импульсы (а в прототипе используют пачки из пар импульсов с изменяемой фазой), тем самым исключая в принципе влияние фазовой нестабильности (джиттера) между импульсами, который приводит к ухудшению отношения сигнал/шум в прототипной схеме. Причем в оптическое волокно посылают по очереди несколько (K) одиночных зондирующих импульсов с частотами, отличающимися друг от друга на величину $\Delta f_{сч} \leq 1/T_{им}$, где $\Delta f_{сч}$ - смещение по частоте, $T_{им}$ - длительность зондирующего импульса. От каждого зондирующего импульса формируется рефлектограмма, статистически отличная от рефлектограммы, формируемой импульсом на другой частоте, тем самым вероятность перекрытия «слепых зон» (зон нечувствительности) увеличивается в \sqrt{K} раз после формирования комбинированной (составной) рефлектограммы, составленной из участков с максимальными чувствительностями отдельных рефлектограмм. Кроме того, возможно применение не одного, а проложенных рядом друг с другом нескольких чувствительных оптических волокон в M -каналах. Рефлектограммы оптических волокон каналов с принципиально отличными друг от друга характеристиками также имеют различные статистические характеристики, что в итоге после формирования из отдельных рефлектограмм комбинированной (составной) рефлектограммы, составленной из участков с максимальными чувствительностями отдельных рефлектограмм, увеличивает вероятность перекрытия «слепых зон» уже в \sqrt{N} раз, где $N=K*M$.

Перечень фигур

На фиг. 1 представлена схема предлагаемого волоконно-оптического распределенного виброакустического датчика на основе фазочувствительного рефлектометра (оптико-электронная схема когерентного рефлектометра) с улучшенной характеристикой чувствительности.

На фиг. 2 представлена функциональная схема частотно-импульсного формирователя.

На фиг. 3 представлен пример формирования графика комбинированной составной рефлектограммы из графиков четырех отдельных рефлектограмм при $N=4$ (возможные комбинации K и M при этом: $K=4, M=1$ или $K=2, M=2$).

Осуществление изобретения

На фиг. 1 показана схема предлагаемого устройства. Устройство состоит из узкополосного источника излучения 1 (лазера с шириной полосы частот менее 35 кГц), волоконно оптического эрбиевого усилителя 2, усиливающего излучение источника до мощности 1 Вт, АОМ 3, работающего в импульсном режиме и вносящего частотный сдвиг в оптическое излучение, волоконно-оптического разветвителя (на M -каналов) 4, каждый из M -каналов состоит из чувствительного элемента - оптического волокна 5, циркулятора 6, волоконно-оптического эрбиевого усилителя 7 в приемной части канала, после него узкополосного оптического фильтра 8, далее фотоприемного модуля 9, выход которого соединен со своим канальным входом модуля многоканального (не менее M -каналов) АЦП 10, выход которого соединен со входом цифрового процессора формирования управляющих импульсов, управления, обработки и передачи данных 11, далее частотно-импульсного формирователя 12 и специализированного драйвера 13 акустооптического модулятора 13. Каждый из M -каналов содержит компоненты: 5, 6, 7, 8, 9. В таких каналах можно использовать стандартное одномодовое оптическое волокно (например, марки G652, G657) и серийно выпускаемый волоконно-оптический кабель для линий связи. Все волокна M -каналов проложены вдоль друг друга рядом.

Устройство работает следующим образом. В чувствительный элемент - оптическое волокно 5 (фиг. 1) - посылаются зондирующие импульсы разной частоты, которые

формирует АОМ 3 из непрерывного излучения узкополосного лазера 1. Особенностью предлагаемой оптической схемы является то, что АОМ, формирующий зондирующие импульсы, расположен после оптического эрбиевого усилителя, исключая излучение спонтанной эмиссии оптического усилителя в оптическую линию. Данное решение

5 позволяет увеличить отношение сигнал/шум и тем самым увеличить чувствительность системы. Для достижения достаточного уровня мощности излучение узкополосного лазера 1 усиливается с помощью оптического эрбиевого усилителя 2 до значений 200-1000 мВт, после чего поступает на АОМ 3. После АОМ 3 импульсное излучение поступает на разветвитель 4, и по каждому из каналов разветвителя импульсное

10 излучение поступает на свой циркулятор 6 и далее в оптическое волокно 5. В оптическом волокне 5 импульсное излучение рассеивается на неоднородностях показателя преломления волокна, и часть его возвращается обратно назад и поступает на циркулятор 6. После циркулятора 6 обратнорассеянное излучение поступает на оптический эрбиевый усилитель 7, далее излучение отфильтровывается узкополосным

15 оптическим фильтром 8 и поступает на фотоприемник 9. После фотоприемника излучение, преобразованное в электрический сигнал, поступает на свой вход многоканального АЦП 10. От АЦП оцифрованный электрический сигнал приходит на процессор 11, обеспечивающий синхронное формирование зондирующих импульсов и синхронный прием оцифрованного обратнорассеянного сигнала. Формирование

20 зондирующих импульсов на различных частотах происходит в процессоре 11 и реализуется благодаря применению частотно-импульсного формирователя 12 и драйвера 13 АОМ 3.

АОМ 3 формирует оптический импульс за счет создания Брэгговской дифракционной решетки в диоксиде теллура посредством бегущей акустической волны. Дифракционная

25 решетка отклоняет световой пучок в первый максимум дифракции Брэгга, где находится коллиматор. Бегущая акустическая волна может формироваться на частоте от 40 до 200 МГц и на эту частоту, за счет доплеровского эффекта, возрастает центральная частота проходящего через диоксид теллура оптического излучения. Сложение

30 радиочастоты, подаваемой на АОМ, с оптической частотой используется для изменения суммарной частоты излучения. Следует иметь в виду, что изменение радиочастоты, подаваемой на АОМ 3, приводит к изменению периода наведенной брэгговской дифракционной решетки, что, в свою очередь, приводит к изменению угла дифракции Брэгга. Изменение угла дифракции Брэгга приводит к тому, что в выводящий излучение коллиматор, установленный из расчета конкретной частоты, приходит не весь световой

35 пучок. Таким образом, меняя частоту подаваемого на АОМ радиочастотного сигнала, не только изменяют частоту выходящего из АОМ излучения, но и изменяют вносимые потери. АОМ позволяет изменять собственную центральную частоту в пределах $\Delta f_{\text{АОМ}} \pm 10\%$ при увеличении вносимых потерь не более чем на 3 дБ.

Для решения задачи существенного уменьшения зон нечувствительности используется процессор 11 обработки, который обеспечивает:

40

- формирование зондирующих импульсов с различными частотами посредством коммутации соответствующих частотных выходов частотно-импульсного формирователя 12;
- прием и формирование рефлектограмм для зондирующих импульсов с различными

45 частотами;

- формирование в реальном масштабе времени комбинированной составной рефлектограммы на основе отдельных N-рефлектограмм, полученных от зондирующих импульсов на разных частотах и, возможно, из оптических волокон нескольких каналов.

На фиг. 2 представлена функциональная схема частотно-импульсного формирователя 12. От процессора обработки 11 на частотно-импульсный формирователь приходит управляющий сигнал 12.1, поступающий на логическую схему 12.2, которая вырабатывает сигнал формирования импульса 12.3 и сигнал выбора частотного канала 12.4. Сигнал выбора частотного канала 12.4 поступает на мультиплексор 12.6, который производит переключения частотных сигналов, поступающих на него от синтезатора частот 12.5. От мультиплексора 12.6 на драйвер 13 АОМ 3 поступает сигнал частотного канала 12.7. Сигнал формирования импульса 12.3 и сигнал частотного канала 12.7 поступают на драйвер 13 АОМ 3 синхронно.

После АОМ 3 в оптическое волокно 6 (или в волокна 6 после разветвителя 4, если каналов и волокон несколько) посылают последовательно K одиночных зондирующих импульсов (например, для $N=K \cdot M=4$ возможны две комбинации: $K=4, M=1$ или $K=2, M=2$, где K - количество частот, M - количество волокон) на частотах, отличающихся от импульса к импульсу на величину, большую $\Delta f_{\text{сч}} \leq 1/T_{\text{ИМ}}$, где $\Delta f_{\text{сч}}$ - смещение по частоте, $T_{\text{ИМ}}$ - длительность зондирующего импульса. Пришедшие из оптических волокон от каждого импульса сигналы обратного рассеяния сохраняют в оперативном запоминающем устройстве цифрового процессора 11 в виде пришедших друг за другом N рефлектограмм с их пространственной зависимостью по длине их волокон.

На фиг. 3 представлен пример реализации способа формирования графика комбинированной составной рефлектограммы из графиков отдельных рефлектограмм при $N=4$ (верхние 4 графика - отдельные рефлектограммы, нижний график - итоговая составная комбинированная рефлектограмма, овалами на графиках отдельных рефлектограмм выделены участки максимальной чувствительности, из которых можно составлять комбинированную рефлектограмму). Для обработки отдельных N рефлектограмм волокно, с которого получены рефлектограммы, математически делится на равные интервалы по длине волокна. Длину интервала выбирают в зависимости от периода (длины) повторения локальных максимумов рефлектограммы, который зависит от длительности зондирующего импульса (примерно, в четыре раза меньше полуширины зондирующего импульса, то есть примерно, от 5 до 10 м). Для каждого интервала волокна проводят сравнение интервалов N рефлектограмм и выбирают интервал той рефлектограммы, который имеет наибольший уровень сигнала, а значит, и наибольший отклик при возможном виброакустическом воздействии на заданном интервале оптического волокна. Последовательно проводят сравнительный анализ всех интервалов и формируют составную комбинированную рефлектограмму. При этом в сформированной составной рефлектограмме в \sqrt{N} раз снижена вероятность нахождения участков, на которых отсутствует отклик на виброакустическое воздействие на оптическое волокно.

После формирования составной рефлектограммы очередной цикл повтора ее формирования требуется производить до изменения спекл-картины рефлектограммы, и этот промежуток времени может составлять от десятков до сотен секунд в зависимости от условий эксплуатации. Стоит отметить, что при периоде формирования составной рефлектограммы в 10 секунд, не может возникнуть трудностей с дальнейшей обработкой сигналов от составной рефлектограммы, так как полоса частот рабочего виброакустического сигнала у фазочувствительного рефлектометра находится в диапазоне от единиц герц и выше практически до нескольких сотен килогерц.

Предлагаемые волоконно-оптический распределенный виброакустический датчик на основе фазочувствительного рефлектометра и способ улучшения его характеристик чувствительности получены в ходе выполнения прикладных научных исследовательских

экспериментальных разработок (ПНИЭР) в рамках Соглашения о предоставлении субсидии №14.577.21.0224 между Министерством образования и науки Российской Федерации и МГТУ им. Н.Э. Баумана.

(57) Формула изобретения

1. Волоконно-оптический распределенный виброакустический датчик на основе фазочувствительного рефлектометра, состоящий из: узкополосного источника излучения, волоконно-оптического усилителя, усиливающего излучение источника, акустооптического модулятора, работающего в импульсном режиме и вносящего частотный сдвиг в оптическое излучение, волоконно-оптического разветвителя на М-каналов в случае $M > 1$, каждый канал состоит из чувствительного элемента - оптического волокна, циркулятора, волоконно-оптического эрбиевого усилителя в приемной части канала, после этого усилителя узкополосного оптического фильтра и далее фотоприемного модуля с выходом на канал многоканального АЦП с количеством входов не менее числа задействованных каналов, таким образом, выходы всех каналов подсоединены к своим входам многоканального АЦП, на выходе которого последовательно друг за другом установлены цифровой процессор формирования управляющих импульсов, управления, обработки и передачи данных, плата частотно-импульсного формирователя и драйвер АОМ; все волокна М-каналов проложены вдоль друг друга рядом.

2. Датчик по п. 1, характеризующийся тем, что узкополосным источником излучения является лазер с шириной полосы частот менее 35 кГц, следующий за ним эрбиевый усилитель имеет возможность усиления мощности излучения источника до 1 Вт.

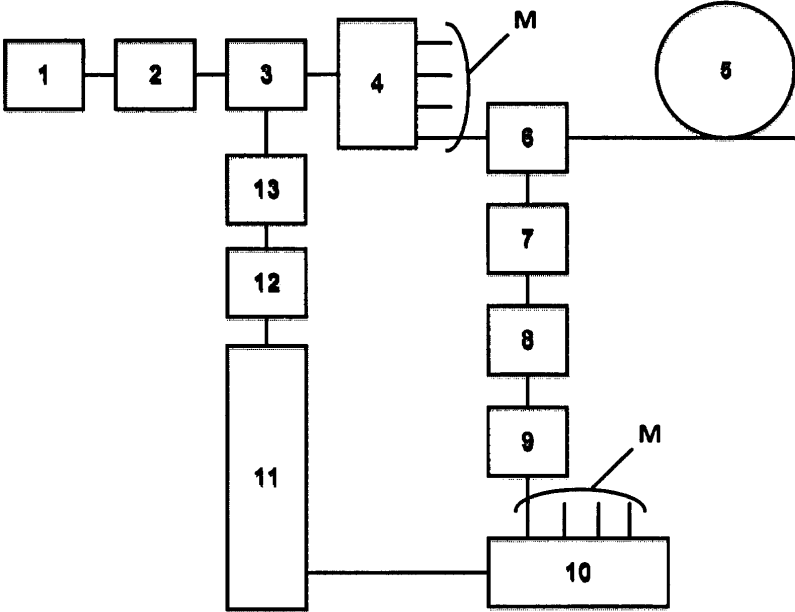
3. Способ выравнивания характеристик чувствительности волоконно-оптического распределенного виброакустического датчика по п. 1, характеризующийся изменением частоты одиночных импульсов, посылаемых в чувствительный элемент - оптическое волокно, частоту излучения сканирующих импульсов для оптической схемы датчика складывают из частоты узкополосного источника излучения и доплеровского увеличения частоты, вносимой АОМ, при этом изменение частоты излучения $\Delta f_{\text{сч}}$

сканирующих импульсов на величину, больше или равную $\Delta f_{\text{сч}} \leq 1/T_{\text{им}}$, где $T_{\text{им}}$ - длительность сканирующих импульсов, приводит к формированию новой статистической картины сигналов обратного рассеяния и, соответственно, формированию рефлектограммы, статистически отличной от рефлектограммы, формируемой импульсом на другой частоте, тем самым вероятность перекрытия «слепых зон» (зон

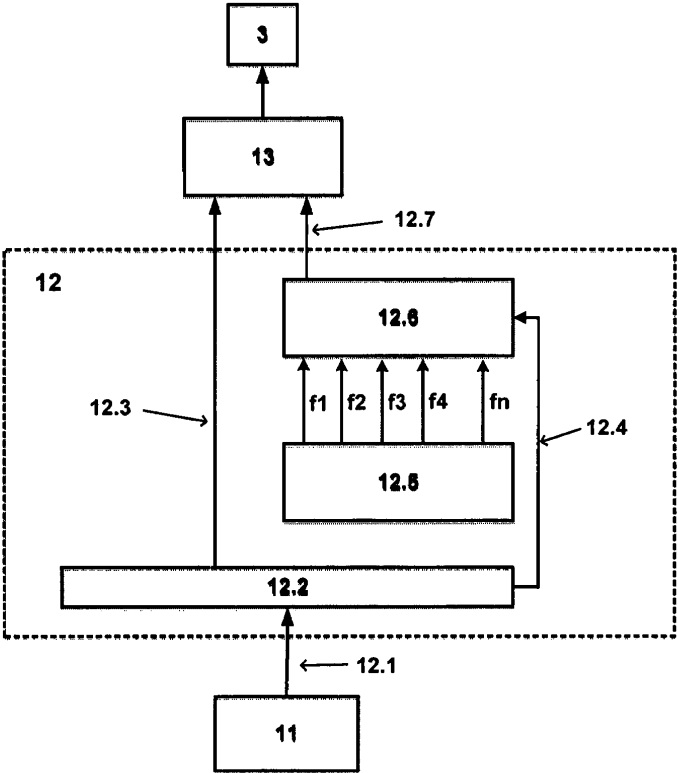
нечувствительности) увеличивают в \sqrt{K} раз после формирования комбинированной составной рефлектограммы, составленной из участков с максимальными чувствительностями отдельных рефлектограмм, а с учетом применения проложенных вдоль друг друга рядом нескольких чувствительных оптических волокон в М-каналах в итоге после формирования из отдельных рефлектограмм комбинированной составной рефлектограммы вероятность перекрытия «слепых зон» увеличивают в \sqrt{N} раз, и $N = K \cdot M$, где N - количество рефлектограмм, K - количество частот, M - количество волокон.

4. Способ по п. 3, характеризующийся тем, что длительность сканирующих импульсов составляет $T_{\text{им}} = 50\text{-}500$ нс, соответственно диапазон частот $\Delta f_{\text{им}} = 20\text{-}2$ МГц.

1

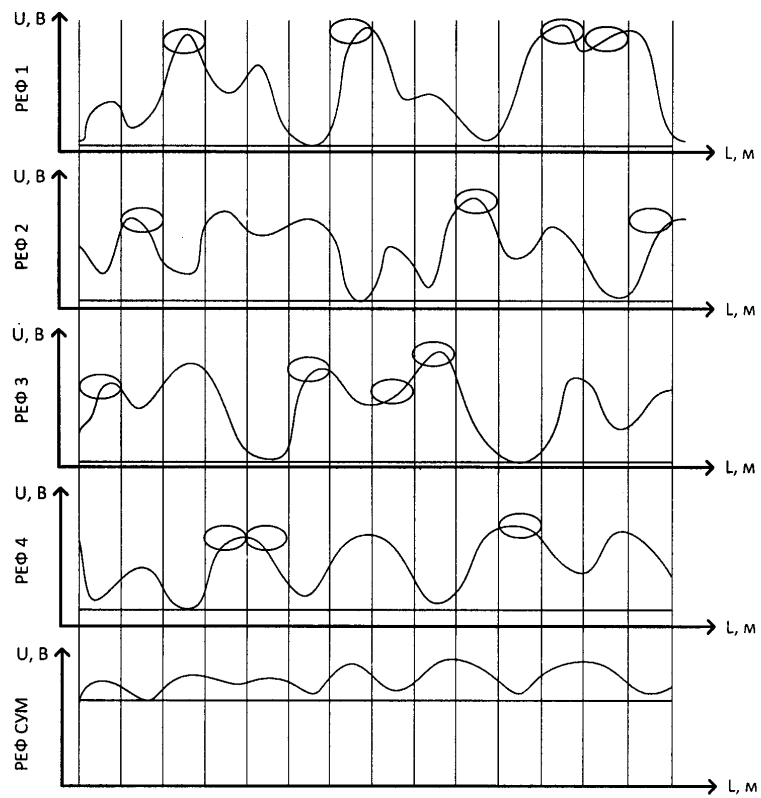


Фиг.1



Фиг.2

2



Фиг.3