



**ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ**

**(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ**

(21)(22) Заявка: 2015120003/28, 27.05.2015

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
27.05.2015

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 27.05.2015

(45) Опубликовано: 10.07.2016 Бюл. № 19

(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: RU 2485454 C2, 20.06.2013. RU 2349939 C1, 20.03.2009. KR 2009028044 A, 18.03.2009. US 1068492 B1, 10.11.2004.

Адрес для переписки:

105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, стр. 1,  
МГТУ им. Н.Э. Баумана, ЦЗИС, для Пнёва А.Б.,  
НОЦ Фотоника

(72) Автор(ы):

Пнёв Алексей Борисович (RU),  
Степанов Константин Викторович (RU),  
Жирнов Андрей Андреевич (RU),  
Нестеров Евгений Тарасович (RU),  
Сазонкин Станислав Григорьевич (RU),  
Карасик Валерий Ефимович (RU),  
Гарин Олег Анатольевич (RU),  
Шелестов Дмитрий Алексеевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):

федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
профессионального образования  
"Московский государственный технический  
университет имени Н.Э. Баумана" (МГТУ  
им. Н.Э. Баумана) (RU)

**(54) ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОЕ УСТРОЙСТВО БОЛЬШОЙ ПРОТЯЖЕННОСТИ С ИСТОЧНИКОМ МАЛОЙ МОЩНОСТИ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ВИБРАЦИОННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ**

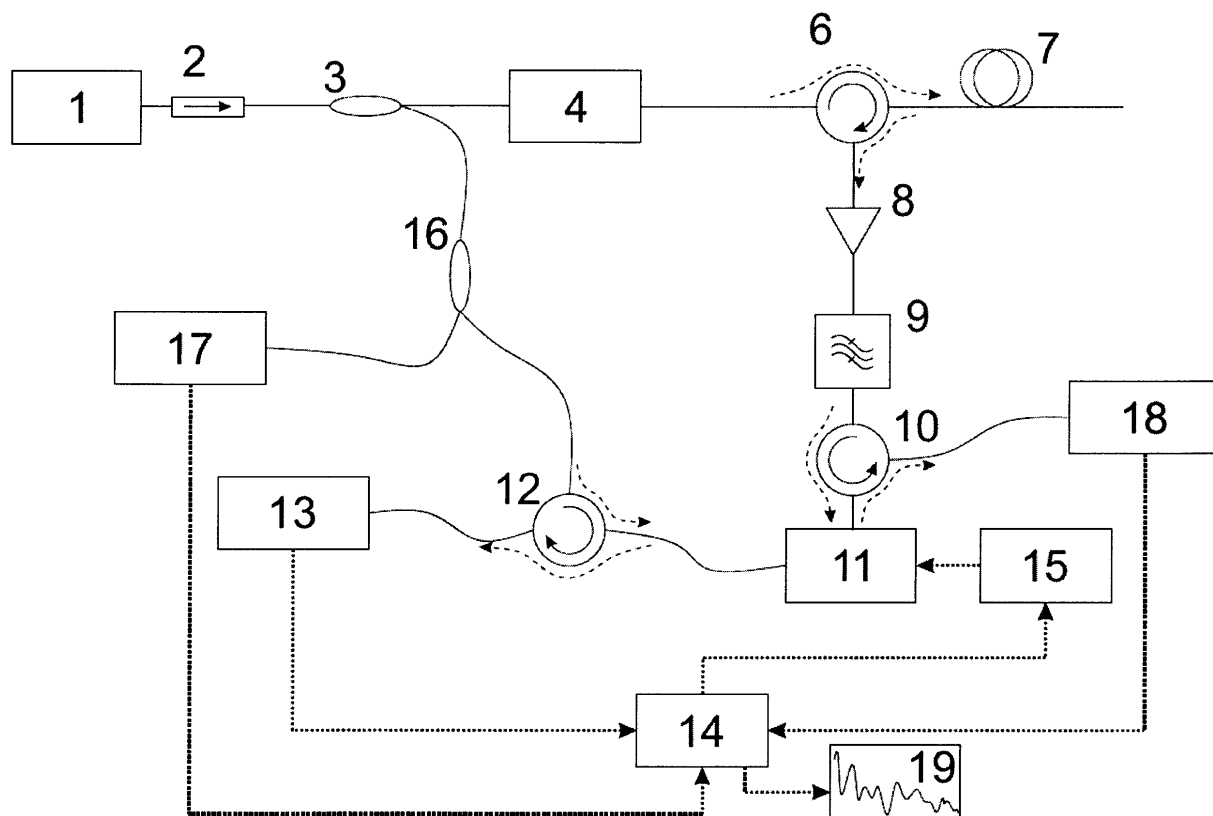
(57) Реферат:

Изобретение относится к волоконно-оптическим сенсорным системам, используемым в системах мониторинга протяженных и крупногабаритных объектов, и может быть использовано для мониторинга состояния судна и элементов его конструкции (баки и т.д.) путем акустоэмиссионной диагностики, детектируя акустические сигналы от этих элементов, которые воздействуют на оптическое волокно и могут быть зарегистрированы при помощи метода когерентной рефлектометрии. Задача - повышение динамического диапазона полезного сигнала измерений вибраций акустического частотного диапазона и соответствующее увеличение длины сенсорного участка вдоль инспектируемого объекта. Технический результат достигается за счет того, что волоконно-оптическое устройство большой протяженности с источником излучения малой мощности для регистрации вибрационных воздействий акустического частотного диапазона включает в себя первую последовательную цепочку измерительного канала из узкополосного

когерентного источника излучения (лазера с большой длиной когерентности) 1 малой мощности, оптического изолятора 2, разветвителя 3, управляемого драйвером акустооптического модулятора 4, оптического циркулятора 6 и сенсорного оптоволоконного участка 7. Для обратнорассеянного сигнала из сенсорного участка 7 через первый циркулятор 6 есть вторая последовательная цепочка из предусилителя 8, оптического фильтра 9, второго циркулятора 10, узкополосного фильтра Фабри-Перо 11, третьего циркулятора 12 и первого цифрового фотоприемного устройства 13. Со второго выхода разветвителя 3 в калибровочный канал со вторым разветвителем 16 для деления неискаженной части сигнала из источника излучения 1 во второе цифровое фотоприемное устройство 17 и подачи второй части этого сигнала исходного непрерывного излучения через третий циркулятор 12, далее через фильтр Фабри-Перо 11 и второй циркулятор 10 в третье цифровое фотоприемное устройство 18. Выходы всех трех цифровых фотоприемных устройств заведены в цифровой

вычислительный блок 14, из которого выработанный в блоке 14 сигнал обратной связи через блок обратной связи 15 поступает на вход подстройки фильтра Фабри-Перо 11. Выход вычислительного блока 14 по отображению

результатов инспектирования (регистрации вибрационных воздействий на сенсорный оптоволоконный участок) соединен с блоком отображения 19. 2 ил.



Фиг.1



FEDERAL SERVICE  
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(19) **RU** (11) **2 589 492** (13) **C1**

(51) Int. Cl.  
*G01H 9/00* (2006.01)

## (12) ABSTRACT OF INVENTION

(21)(22) Application: 2015120003/28, 27.05.2015

(24) Effective date for property rights:  
27.05.2015

Priority:

(22) Date of filing: 27.05.2015

(45) Date of publication: 10.07.2016 Bull. № 19

Mail address:

105005, Moskva, ul. 2-ja Baumanskaja, 5, str. 1,  
MG TU im. N.E. Bauman, TSZIS, dlja Pnava A.B.,  
NOTS Fotonika

(72) Inventor(s):

Pnev Aleksej Borisovich (RU),  
Stepanov Konstantin Viktorovich (RU),  
ZHirnov Andrej Andreevich (RU),  
Nesterov Evgenij Tarasovich (RU),  
Sazonkin Stanislav Grigorevich (RU),  
Karasik Valerij Efimovich (RU),  
Garin Oleg Anatolevich (RU),  
SHelestov Dmitrij Alekseevich (RU)

(73) Proprietor(s):

federalnoe gosudarstvennoe byudzhethoe  
obrazovatelnoe uchrezhdenie vysshego  
professionalnogo obrazovaniya "Moskovskij  
gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet imeni  
N.E. Bauman" (MG TU im. N.E. Bauman)  
(RU)

## (54) FIBRE-OPTIC DEVICE OF LONG LENGTH WITH LOW-POWER SOURCE FOR DETECTING VIBRATION ACTION

(57) Abstract:

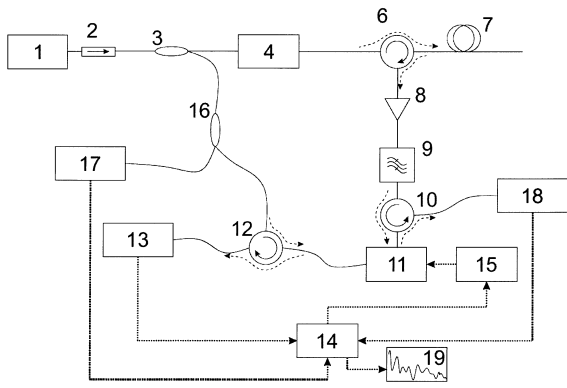
FIELD: computer engineering.

SUBSTANCE: invention relates to fibre-optic sensor systems used in systems for monitoring of extended and large-size objects and can be used for monitoring state of vessel and elements of its design (tanks, etc.) by acoustic emission diagnosis, detecting acoustic signals from these elements, which act on optical fibre and can be registered by means of coherent reflectometry method. Technical result is achieved by fact that fibre-optic device of large length with a radiation source of low power for detecting vibration action acoustic frequency range includes first chain of measuring channel of narrow-band coherent low-power radiation source (laser with long coherence length) 1, optical insulator 2, coupler 3, controlled by acoustic-optical modulator 4 driver, optical circulator 6 and fibre-optic sensor section 7. For scattered signal from the sensor section 7 through first circulator 6, there is second serial circuit from preamplifier 8, optical filter 9, second circulator 10, narrow-band Fabry-Perot filter 11, third circulator 12 and first digital photo receiver 13. From second output of splitter 3 in calibration channel with second splitter 16 for dividing undistorted

portion of radiation source 1 into the second digital photodetector 17 and delivery of second part of that initial continuous radiation signal through third circulator 12, then through Fabry-Perot filter 11 and second circulator 10 into third digital photo receiver 18. Outputs of all three digital photodetectors are connected to digital computing unit 14, from which feedback signal generated in unit 14 is supplied to tuning input of Fabry-Perot filter 11 via feedback unit 15. Output of computer unit 14 for displaying results of inspecting (registration of vibration effect on sensory fibre-optic section) is connected to display unit 19.

EFFECT: problem is increasing of dynamic range of useful signal measurements of acoustic vibrations of frequency range and longer length of sensor section along inspected object.

1 cl, 2 dwg



Фиг.1

## Область техники

Изобретение относится к волоконно-оптическим сенсорным системам, используемым в системах мониторинга протяженных и крупногабаритных объектов, и может быть использовано для мониторинга состояния судна и элементов его конструкции (баки и т.д.) путем акустоэмиссионной диагностики, детектируя акустические сигналы от этих элементов, которые воздействуют на оптическое волокно и могут быть зарегистрированы при помощи метода когерентной рефлектометрии.

## Уровень техники

Метод когерентной рефлектометрии позволяет регистрировать хаотичный по времени сигнал рассеяния (рефлектограмму), который остается при условии стабильности частоты и отсутствии воздействия на чувствительное оптическое волокно неизменным, а при наличии тепловых (деформация волокна под действием нагрева или охлаждения) или механических воздействий (деформация волокна из-за внешнего растяжения/сжатия) изменяется. Электронная обработка получаемого сигнала на данный момент преимущественно развита для выделения механических воздействий на волокно в диапазоне 10 Гц ... 10 кГц, что хорошо согласуется с диапазоном акустических сигналов различной природы, вызывающих вибрацию сенсорного волокна. Эта вибрация возникает при распространении акустических волн в среде (корпус судна, бака, почва и т.д.) от источника вибрации (вибрирующие края трещины, идущий человек) до уложенного сенсорного кабеля. Акустические волны вызывают вибрацию кабеля на своей частоте, что выделяется на фоне хаотичного сигнала при помощи электронной обработки.

Базовое устройство и метод когерентной рефлектометрии детектирования акустических полей были описаны в патенте США US 5194847 (МПК G01H 9/00; G01L 1/24; G01L 11/02; G08B 13/12; G08B 13/186; (IPC 1-7): G08B 13/10; G08B 13/18, опубл. 1993-03-16). Метод подготовки и использования когерентной рефлектометрии включают следующие основные операции: - размещение чувствительного оптического волокна вдоль инспектируемого протяженного объекта; - подача в расположенную вдоль протяженного объекта линию определенной длины импульсов когерентного оптического излучения; - прием сигналов обратного рассеяния и выделение сигнала, показывающего факт внешнего воздействия по возмущениям в указанных сигналах обратного рассеяния.

Базовому методу соответствуют базовые схемы устройств реализации метода, а также и множество производных схем устройств когерентной рефлектометрии.

При прохождении в оптическом волокне когерентного излучения его часть вследствие наличия хаотических много меньших по размеру по сравнению с длиной волны излучения микронеоднородностей в волокне обратно рассеивается. Этот обратно рассеянный сигнал в схеме рефлектометра хаотичен по времени.

Увеличение длины сенсорного участка в устройствах когерентной рефлектометрии осуществляется за счет использования мощного источника излучения (порядка 300 мВт и выше). Однако с увеличением мощности источника излучения в волокне начинают проявляться нелинейные эффекты, которые негативно отражаются на измерительных качествах системы. Известны следующие нелинейные эффекты: вынужденное комбинационное рассеяние (ВКР), вынужденное рассеяние мандельштамма-бриллюэна (ВРМБ), фазовая самомодуляция (ФСМ) и четырехволновое смешение, в данном случае проявляющееся в виде модуляционной неустойчивости (МН). Пороговым нелинейным эффектом считается модуляционная неустойчивость, для проявления которой требуется наименьшая мощность. Из-за этих нелинейных эффектов при увеличении входной мощности с определенного порогового значения рассеянная мощность перестает

увеличиваться.

Таким образом, в целом недостатками устройств когерентной рефлектометрии с мощными источниками излучения (в том числе прототипных устройств из патента США US 5194847) являются: нелинейность выходного сигнала, необходимость

использования дорогостоящего мощного источника излучения, а также относительно низкий динамический диапазон системы.

#### Раскрытие изобретения

Задачей изобретения является повышение динамического диапазона полезного сигнала измерений вибраций акустического частотного диапазона и соответствующее

увеличение длины сенсорного участка вдоль инспектируемого объекта.

Технический результат достигается за счет того, что волоконно-оптическое устройство большой протяженности с источником излучения малой мощности для

регистрации вибрационных воздействий акустического частотного диапазона включает в себя первую последовательную цепочку измерительного канала из узкополосного

когерентного источника излучения (лазера с большой длиной когерентности) 1 малой мощности, оптического изолятора 2, разветвителя 3, управляемого драйвером акустооптического модулятора 4, оптического циркулятора 6 и сенсорного оптоволоконного участка 7. Для обратнорассеянного сигнала из сенсорного участка 7 через первый циркулятор 6 есть вторая последовательная цепочка из предусилителя

8, оптического фильтра 9, второго циркулятора 10, узкополосного фильтра Фабри-Перо 11, третьего циркулятора 12 и первого цифрового фотоприемного устройства 13. Со второго выхода разветвителя 3 в калибровочный канал со вторым разветвителем 16 для деления неискаженной части сигнала из источника излучения 1 во второе цифровое фотоприемное устройство 17 и подачи второй части этого сигнала исходного

#### Перечень чертежей

На фиг. 1 представлена схема предлагаемого устройства.

На фиг. 2 представлены графики зависимостей предельной дальности сенсорного участка от коэффициента усиления предусилителя для системы, собранной по схеме, в которой достижение максимальной длины опрашиваемого участка осуществляется за счет введения в волокно импульса как можно большей мощности, и для системы, собранной по предлагаемой схеме.

#### Осуществление изобретения

На фиг. 1 показана схема предлагаемого устройства. Устройство содержит лазер 1 с большой длиной когерентности и малой мощностью, оптический изолятор 2, два разветвителя 3, 16, акустооптический модулятор 4 с драйвером, управляющим открытием (пропусканием излучения) и закрытием (непропусканием излучения) данного модулятора, три оптических циркулятора 6, 10, 12, сенсорный участок 7, предусилитель 8, оптический фильтр 9, три цифровых фотоприемных устройства (ФПУ) 13, 17, 18, вычислительный цифровой блок 14, узкополосный фильтр Фабри-Перо 11 с обратной связью из цифрового блока 14 через блок обратной связи 15, блок отображения

результатов инспектирования 19.

Лазер 1 с большой длиной когерентности последовательно соединен с оптическим изолятором 2. Сразу после изолятора 2 (изолятор предназначен для защиты источника излучения) излучение поступает на разветвитель 3, после которого большая часть излучения поступает на акустооптический модулятор 4, который управляется драйвером 5 и осуществляет модуляцию непрерывного излучения в импульсное, а меньшая часть - к разветвителю 16, после которого одна его часть поступает сразу на ФПУ 17, а другая - последовательно пройдя циркулятор 12, узкополосный фильтр Фабри-Перо 11 и циркулятор 10, поступает на ФПУ 18. Выбор разветвителей с различными коэффициентами деления обусловлен различными требованиями к мощностям сигналов в различных частях схемы. Основная часть мощности через разветвитель 3 поступает в измерительный канал, из которого извлекается слабый сигнал рассеяния. Для калибровочного канала, в котором потери пренебрежимо малы, достаточно небольшой части исходной мощности. В калибровочном канале необходимо деление излучения на две части для подачи на два различных приемника - для этого деления используется разветвитель 16. После акусто-оптического модулятора 4 импульсное излучение через циркулятор 6 поступает в сенсорное оптоволокно 7, расположенное вдоль инспектируемого объекта. Обратнорассеянное от неоднородностей в сенсорном оптоволокне 7 излучение проходит циркулятор 6 и попадает на предусилитель 8. После предусилителя 8 возрастают как полезный сигнал, так и шумы. Для уменьшения нежелательных спонтанных шумов используется оптический фильтр 9, усиленный обратнорассеянный сигнал, на который поступает после предусилителя 8. Затем усиленное и отфильтрованное обратнорассеянное излучение, предварительно пройдя циркулятор 10, попадает на узкополосный фильтр Фабри-Перо 11, который служит для более узкой фильтрации излучения. Его применение дополняет применение оптического фильтра, так как фильтр Фабри-Перо имеет гребенчатую структуру. Пройдя узкополосный фильтр Фабри-Перо 11, излучение последовательно проходит циркулятор 12 и затем регистрируется на цифровом ФПУ 13. Узкополосный фильтр Фабри-Перо 11 имеет и другое назначение - компенсация дрейфа длины волны излучения лазера. Когда длина волны излучения лазера начинает изменяться (например, из-за температурного дрейфа), через фильтр проходит меньше излучения, что регистрируется на цифровом ФПУ 18 как резкое (в 1,5 и более раз) уменьшение интенсивности. Согласно алгоритму компенсации изменения длины волны возможен математический учет дрейфа длины волны источника в цифровом вычислительном блоке 14. Расчеты и математические преобразования осуществляются в вычислительном блоке 14, на который приходят сигналы со всех трех цифровых ФПУ:

а) неискаженная ничем часть сигнала напрямую с источника излучения 1 через разветвители 3, 16 до ФПУ 17;

б) другая часть исходного непрерывного излучения, прошедшая через разветвители 3, 16, циркулятор 12, фильтр Фабри-Перо 11 и циркулятор 10 до ФПУ 18;

в) регистрируемое обратнорассеянное излучение от сенсорного оптоволокна 7 через циркулятор 6, предусилитель 8, оптический фильтр 9, циркулятор 10, фильтр Фабри-Перо 11, циркулятор 12 до ФПУ 13.

Вычислительный блок 14 связан с блоком обратной связи 15, служащим для подстройки узкополосного фильтра Фабри-Перо 11 во избежание полного ухода полезного сигнала, а также для определения действительной длины волны излучения лазера с учетом температурного дрейфа. Алгоритм компенсации длины волны основан на следующем. Мощность части исходного сигнала, регистрируемого ФПУ 17,

соотносится с мощностью части исходного импульса, прошедшей фильтр Фабри-Перо 11, регистрируемой ФПУ 18. Увеличение этого соотношения говорит о том, что часть излучения не пропускается фильтром Фабри-Перо 11, то есть изменилась его длина волны, которая теперь попадает на края спектра пропускания фильтра 11. В этом случае происходит подстройка спектра пропускания фильтра 11 под изменившуюся длину волны лазера.

В сенсорный участок 7 поступает импульсное маломощное оптическое излучение, что приводит к отсутствию нежелательных нелинейных эффектов, что обеспечивает лучшее сохранение формы импульса сигнала в оптоволокне и меньшее его искажение. Также использование маломощного (порядка десятка мВт, что значительно меньше обычных мощностей в сотни мВт источников излучений аналогичных когерентных рефлектометров) излучения позволяет не использовать бустер (усилитель сильного сигнала, стоящий в измерительном канале), что уменьшает стоимость изделия в целом. Обратное-рассеянное излучение поступает на предусилитель 8 (усилитель слабого сигнала, стоящий на выходе сенсорного участка перед приемником излучения - ФПУ), предназначенный для повышения уровня полезного сигнала выше уровня шумов ФПУ. Усиленный сигнал после предусилителя 8 проходит оптический фильтр 9, что приводит к уменьшению шумов и спонтан-спонтанного излучения. Далее сигнал поступает на узкополосный фильтр Фабри-Перо 11, выполняющий более тонкую фильтрацию, и лишь затем сигнал попадает через циркулятор 12 на ФПУ 13. Другой задачей фильтра Фабри-Перо 11 является компенсация дрейфа длины волны лазера. Когда изменяется длина волны излучения, она может выйти за пределы частотного диапазона пропускания узкополосного фильтра Фабри-Перо 11, что почувствует ФПУ 18 - сигнал на нем начнет резко падать. Для компенсации этого дрейфа и подстройки фильтра Фабри-Перо 11 используется вычислительное устройство 14, обрабатывающее данные со всех ФПУ и связанное с блоком обратной связи 15, который подстраивает узкополосный фильтр Фабри-Перо 11, компенсирующий дрейф длины волны источника.

Эффект повышения динамического диапазона и соответствующего увеличения длины сенсорного участка достигается благодаря следующим факторам:

1) использование маломощного источника излучения приводит к отсутствию нежелательных нелинейных эффектов;

2) фильтрация обратнорассеянного сигнала с помощью перестраиваемого (регулируемого) узкополосного фильтра Фабри-Перо.

Эффект увеличения динамического диапазона достигается благодаря использованию регулируемого в реальном времени узкополосного фильтра с обратной связью на основе интерферометра Фабри-Перо, за счет которого уменьшаются спонтанные шумы, пришедшие из предусилителя 8. Это видно из формулы для расчета соотношения сигнал-шум:

$$SNR = \frac{P_{\text{вых}}}{\sqrt{\sigma_{\text{пр}}^2 + \sigma_{\text{с-сп}}^2 + \sigma_{\text{сп-сп}}^2}}$$

где  $\sigma_{\text{пр}}^2$  - СКО шумов приемника,  $\sigma_{\text{с-сп}}^2$  - СКО шума биения сигнала со спонтанным излучением в оптическом предусилителе,  $\sigma_{\text{сп-сп}}^2$  - СКО шума биения спонтанного излучения со спонтанным в предусилителе, которое описывается формулой:

$$\sigma_{\text{сп-сп}}^2 = (NF \cdot h \cdot \nu \cdot S \cdot G)^2 \cdot 2 \cdot \Delta f (\Delta \nu - 0,5 \cdot \Delta f)$$

где NF - шум-фактор предусилителя, h - постоянная Планка,  $\nu$  - оптическая частота



излучения,  $S$  - чувствительность приемника,  $G$  - коэффициент усиления предусилителя,  $\Delta f$  - полоса частот приемника,  $\Delta \nu$  - ширина полосы оптического предусилителя. Данная формула для расчета соотношения сигнал-шум справедлива для приемника 13.

Например, максимальная длина сенсорного участка 83 км соответствует системе с используемыми на практике величинами параметров:  $G=3000$ ,  $NF=6$ ,  $S \approx 1$  А/Вт,  $\Delta f=2,5$  МГц,  $\Delta \nu=10$  МГц при  $\nu=193,4$  ТГц для случая предельно минимального допустимого значения отношения сигнал-шум  $SNR=1$  и при значениях  $\sigma_{np}^2 = 1,25 \cdot 10^{-14}$ ,

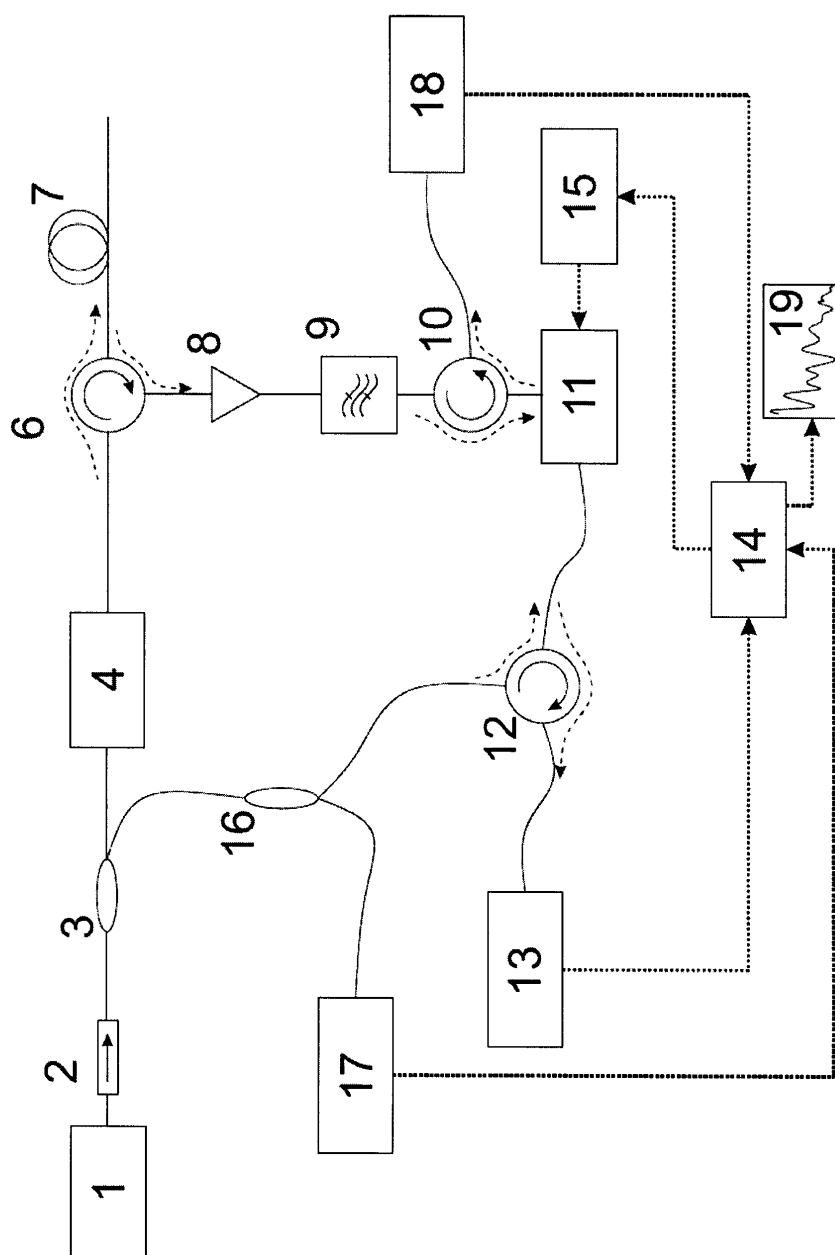
$$\sigma_{с-сп}^2 = 2,4 \cdot 10^{-15}, \sigma_{сп-сп}^2 = 4 \cdot 10^{-16}, P_{вых} = 1,4 \cdot 10^{-7}.$$

Таким образом, сокращая полосу оптических частот за счет использования узкополосного гребенчатого фильтра Фабри-Перо, мы уменьшаем нежелательное спонтанное излучение, тем самым повышая полезное отношение сигнал-шум на ФПУ. Для реализации данного преимущества увеличен коэффициент усиления предусилителя, что легко реализуемо при современном уровне развития техники. На фиг. 2 представлены графики зависимостей предельной максимальной длины сенсорного участка (при достижении отношения сигнал-шум  $SNR=1$ ) от коэффициента усиления предусилителя для системы, собранной по схеме, в которой достижение максимальной длины опрашиваемого участка осуществляется за счет введения в волокно импульса как можно большей мощности (график А), и для системы, собранной по предлагаемой схеме (график Б). Видно, что при росте коэффициента усиления предусилителя увеличение предельной длины сенсорного участка происходит только в системе, собранной по предлагаемой новой схеме (график Б).

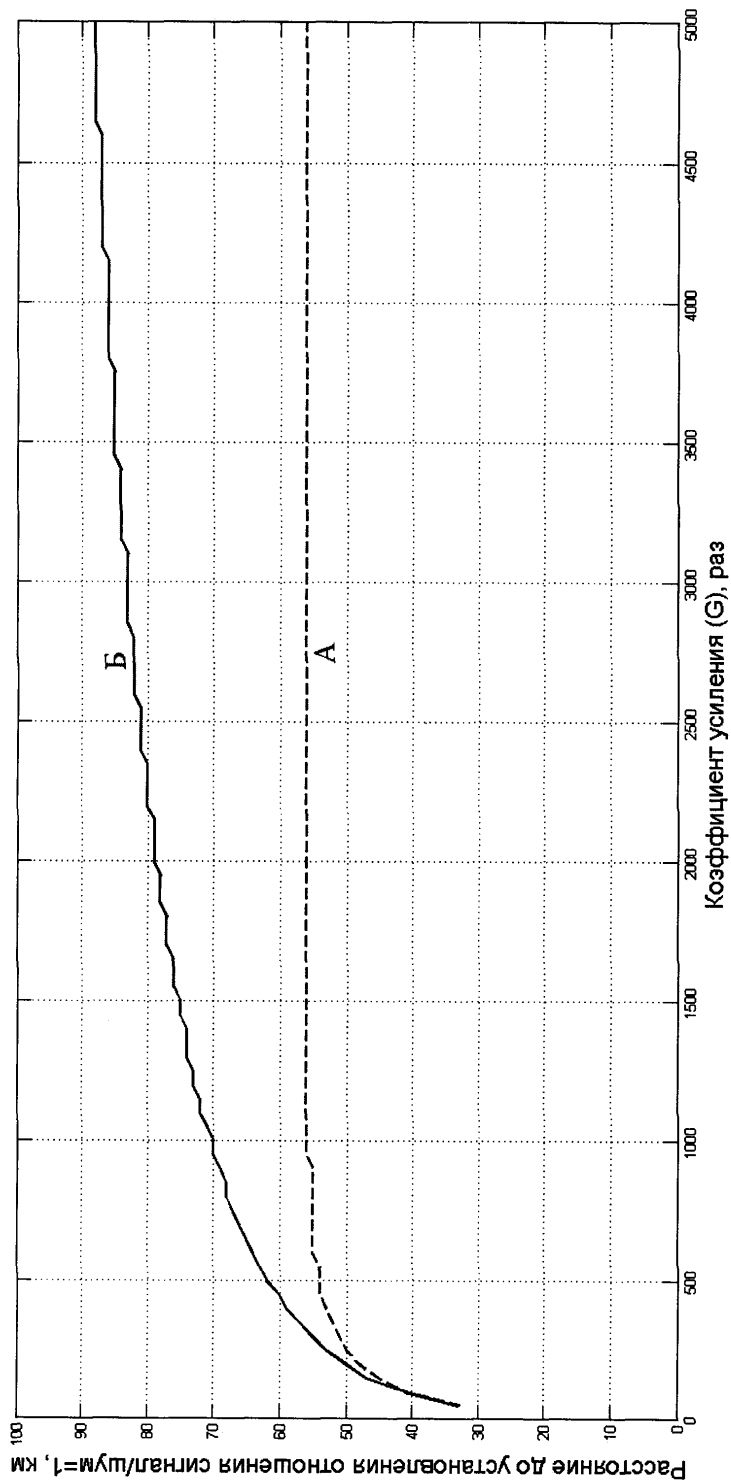
В результате предложенное техническое решение решает задачу по повышению динамического диапазона полезного сигнала измерений вибраций акустического частотного диапазона и соответствующего увеличения длины сенсорного оптоволоконного участка вдоль инспектируемого объекта.

#### Формула изобретения

Волоконно-оптическое устройство большой протяженности с источником излучения малой мощности для регистрации вибрационных воздействий акустического частотного диапазона, включающий в себя первую последовательную цепочку измерительного канала из узкополосного когерентного источника лазерного излучения с большой длиной когерентности 1 малой мощности, оптического изолятора 2, разветвителя 3, управляемого драйвером акусто-оптического модулятора 4, оптического циркулятора 6 и сенсорного оптоволоконного участка 7; для обратнорассеянного сигнала из сенсорного участка 7 через первый циркулятор 6 есть вторая последовательная цепочка из предусилителя 8, оптического фильтра 9, второго циркулятора 10, узкополосного фильтра Фабри-Перо 11, третьего циркулятора 12 и первого цифрового фотоприемного устройства 13; со второго выхода разветвителя 3 в калибровочный канал со вторым разветвителем 16 для деления неискаженной части сигнала из источника излучения 1 во второе цифровое фотоприемное устройство 17 и подачи второй части этого сигнала исходного непрерывного излучения через третий циркулятор 12, далее через фильтр Фабри-Перо 11 и второй циркулятор 10 в третье цифровое фотоприемное устройство 18; выходы всех трех цифровых фотоприемных устройств заведены в цифровой вычислительный блок 14, из которого выработанный в блоке 14 сигнал обратной связи через блок обратной связи 15 поступает на вход подстройки фильтра Фабри-Перо 11; выход вычислительного блока 14 по отображению результатов инспектирования соединен с блоком отображения 19.



Фиг. 1



Фиг.2