



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: 2016143571, 07.11.2016

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
07.11.2016

Дата регистрации:  
14.08.2017

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 07.11.2016

(45) Опубликовано: 14.08.2017 Бюл. № 23

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):

Пнев Алексей Борисович (RU),  
Степанов Константин Викторович (RU),  
Жирнов Андрей Андреевич (RU),  
Нестеров Евгений Тарасович (RU),  
Толстогузов Виктор Леонидович (RU),  
Цепулин Владимир Германович (RU),  
Карасик Валерий Ефимович (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)

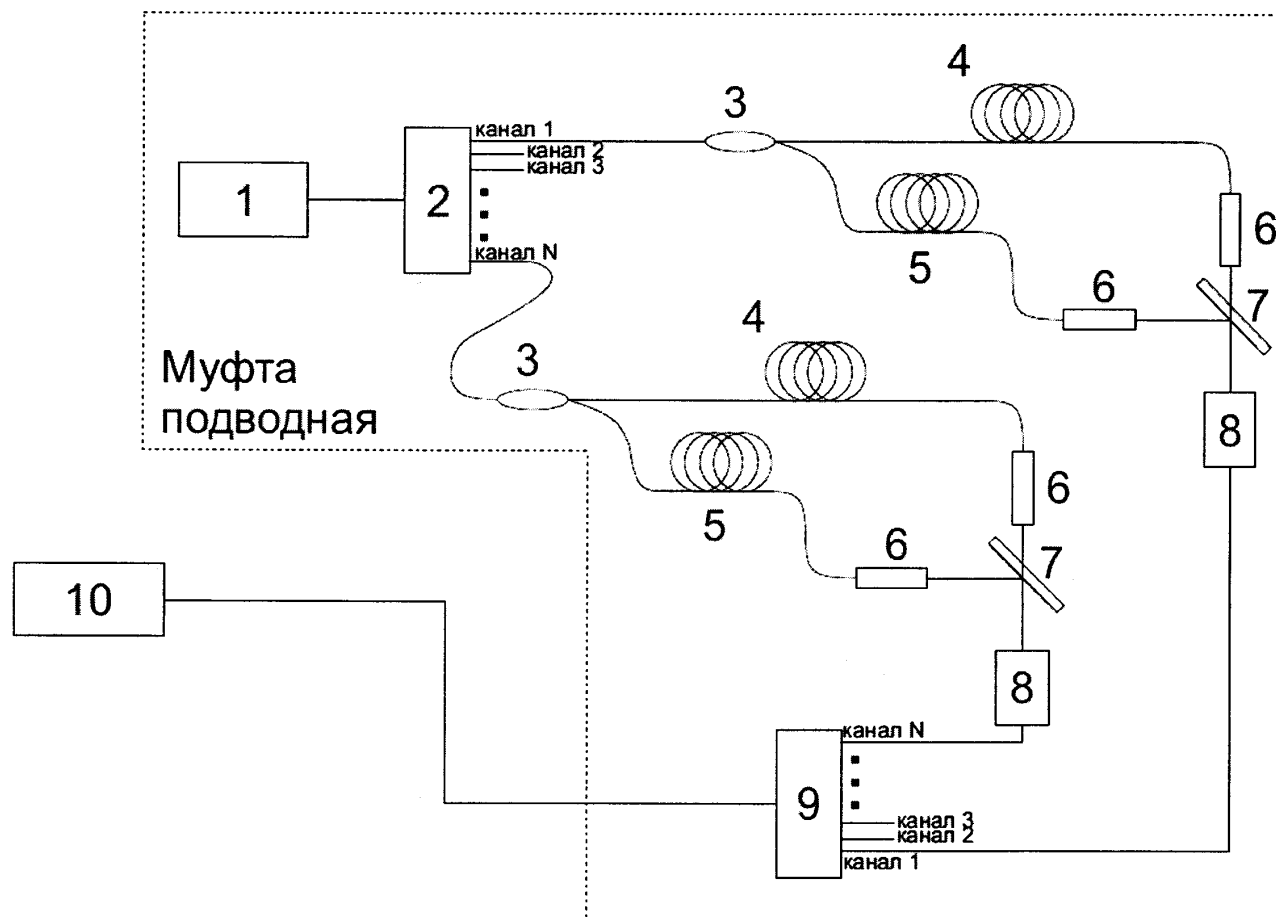
(56) Список документов, цитированных в отчете  
о поиске: RU 2172000 C1, 10.08.2001. RU  
151870 U1, 20.04.2015. US 4320475 A1,  
16.03.1982. EP 1923721 A1, 21.05.2008. US  
4436425 A1, 13.03.1984. US 4442350 A1,  
10.04.1984. US 5587785 A1, 24.12.1996. US  
4115753 A1, 19.09.1978. US 5268739 A1,  
07.12.1993. US 5891747 A1, 06.04.1999.

(54) СВЕРХЧУВСТВИТЕЛЬНАЯ ГИДРОАКУСТИЧЕСКАЯ АНТЕННА НА ОСНОВЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ГИДРОФОНОВ, ИСПОЛЬЗУЮЩАЯ МНОГОЭЛЕМЕНТНЫЕ ПРИЁМНИКИ

(57) Реферат:

Изобретение относится к метрологии, в частности к волоконно-оптическим сенсорным системам. Антенна состоит из двух частей: вневодной части и подводной части, включающей в себя последовательно соединенные лазер, волоконно-оптический разветвитель 1×N излучения - на N каналов, делящий энергию излучения в равных долях на гидрофоны, где N - количество гидрофонов в антенне. Каждый гидрофон состоит из волоконно-оптического разветвителя 1×2, делящего излучение пополам в равном соотношении в волокна опорного и чувствительного плеч интерферометра, намотанных каждое на свои сердечники, при этом волокно опорного плеча намотано на твердый, не подвергающийся изменениям под воздействием

внешнего акустического давления сердечник, а волокно чувствительного плеча намотано на эластичный сердечник, дополнительно усиливающий внешнее акустическое давление на свое волокно для большей чувствительности. На конце каждого волокна опорного и чувствительного плеч интерферометра установлены коллиматоры. Их выходные коллимированные пучки попадают на суммирующую полупропускающую пластинку. Суммарное излучение регистрируется многоэлементным приемником гидрофона. Выходные сигналы N гидрофонов поступают на устройство временного мультиплексирования. Технический результат - повышение чувствительности датчика. 2 ил.



- 1 - узкополосный лазер
- 2 - разветвитель 1xN (1x25)
- 3 - разветвитель 1x2
- 4 - катушка чувствительная
- 5 - катушка опорная
- 6 - коллиматор
- 7 - полупроводниковая пластинка
- 8 - многоэлементный приёмник
- 9 - устройство временного мультиплексирования
- 10 - блок обработки информации, находится на берегу

Фиг.1



FEDERAL SERVICE  
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**(21)(22) Application: **2016143571, 07.11.2016**(24) Effective date for property rights:  
**07.11.2016**Registration date:  
**14.08.2017**

Priority:

(22) Date of filing: **07.11.2016**(45) Date of publication: **14.08.2017** Bull. № 23

Mail address:

105005, Moskva, ul. 2-ya Baumanskaya, 5, str. 1,  
MGТУ im. N.E. Baumana, TSZIS, dlya Pneva A.B.  
(NOTS "Fotonika")

(72) Inventor(s):

**Pnev Aleksej Borisovich (RU),  
Stepanov Konstantin Viktorovich (RU),  
Zhironov Andrej Andreevich (RU),  
Nesterov Evgenij Tarasovich (RU),  
Tolstoguzov Viktor Leonidovich (RU),  
Tsepulin Vladimir Germanovich (RU),  
Karasik Valerij Efimovich (RU)**

(73) Proprietor(s):

**federalnoe gosudarstvennoe byudzhetnoe  
obrazovatelnoe uchrezhdenie vysshego  
obrazovaniya "Moskovskij gosudarstvennyj  
tekhnicheskij universitet imeni N.E. Baumana  
(natsionalnyj issledovatel'skij universitet)"  
(MGТУ im. N.E. Baumana) (RU)**

(54) **SUPER-SENSITIVE HYDROACOUSTIC ANTENNA BASED ON FIBER-OPTIC HYDROPHONES USING MULTI-ELEMENT RECEIVERS**

(57) Abstract:

FIELD: radio engineering, communication.

SUBSTANCE: antenna consists of two parts: an off-shore part and an underwater part comprising a series-connected laser, a fiber-optic radiation splitter 1N× - on N channels, dividing the energy of radiation in equal parts by hydrophones, where N is the number of hydrophones in the antenna. Each hydrophone consists of a fiber-optic splitter 1×2, which divides the radiation in half in an equal proportion into the fibers of the support and sensitive arms of the interferometer, wound each on its cores. The support arm fiber is wound on a solid core not subject to changes under external

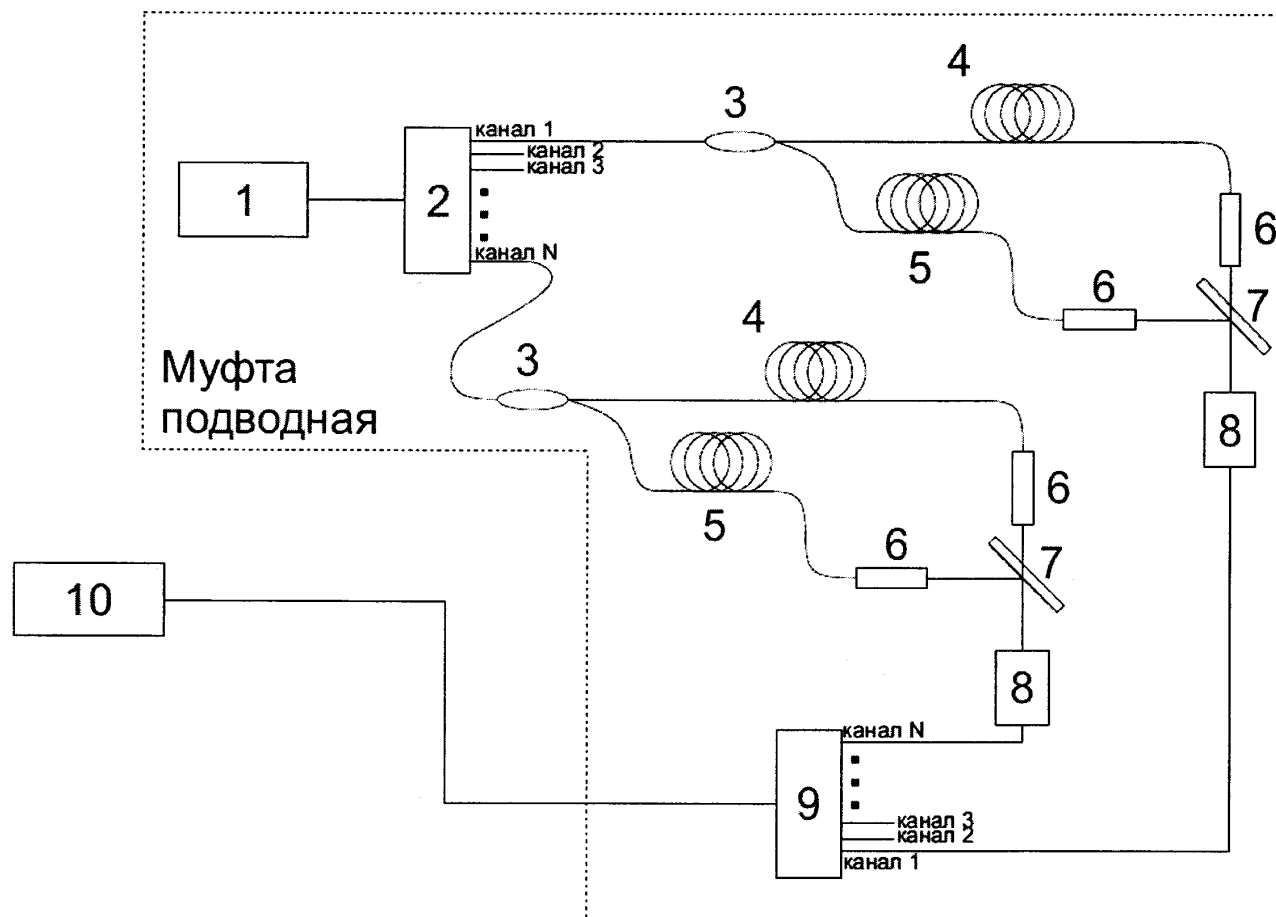
acoustic pressure, and the sensitive arm fiber is wound onto an elastic core, further amplifying the external acoustic pressure on its fiber for greater sensitivity. The end of each fiber of the support and sensitive arms of the interferometer is equipped with collimators. Their output collimated beams fall on the summing semipermanent plate. The total radiation is recorded by a multi-element hydrophone receiver. The output signals of the N hydrophones are input to a time multiplexing device.

EFFECT: increasing the sensor sensitivity.

2 dwg

**RU**  
**2 627 966**  
**C1**

**RU**  
**2 627 966**  
**C1**



- 1 - узкополосный лазер
- 2 - разветвитель 1xN (1x25)
- 3 - разветвитель 1x2
- 4 - катушка чувствительная
- 5 - катушка опорная
- 6 - коллиматор
- 7 - полупроводниковая пластинка
- 8 - многоэлементный приёмник
- 9 - устройство временного мультиплексирования
- 10 - блок обработки информации, находится на берегу

Фиг.1

## Область техники

Изобретение относится к квазираспределенным волоконно-оптическим сенсорным системам, используемым в системах гидролокации и подводного мониторинга, и может быть использовано для определения наличия объектов вблизи системы путем применения

5 волоконно-оптических гидрофонов, детектируя подводные акустические сигналы, испускаемые объектами при их движении, или отраженного зондирующего сигнала от них.

## Уровень техники

Гидроакустические антенны позволяют регистрировать как акустические шумы, производимые находящимися в воде объектами, так и обратно отраженные от этих объектов зондирующие импульсы. Регистрирующими элементами в гидроакустических антеннах являются гидрофоны - подводные акустические датчики, в данном случае

10 волоконно-оптические. Акустический сигнал вызывает изменения в чувствительном плече волоконно-оптического гидрофона и, интерферируя с неизменным сигналом с опорного плеча, попадает на приемник. Электронная обработка получаемого сигнала со всех гидрофонов (как правило, десятки датчиков) в антенне позволяет с большей вероятностью и точностью обнаружить и локализовать объект.

В качестве прототипа была выбрана гидроакустическая антенна, описанная в патенте РФ 2172000 (МПК G01S 3/84, опубл. 10.08.2001). В данной гидроакустической антенне

20 источник когерентного света посылает сигнал в чувствительное и опорное волокна одинаковой длины. Установленное перед одним из плеч интерферометра фазосдвигающее устройство устанавливает требуемую начальную разность фаз оптических лучей. Чувствительные волоконно-оптические катушки, из которых состоит чувствительное плечо, регистрируют шумящие подводные объекты, а за счет известного

25 расстояния между ними и использования корреляторов возможно определение координат регистрируемого объекта.

Основным недостатком прототипа является относительно низкая чувствительность (то есть достаточно высокое акустическое давление, эквивалентное шуму).

## Раскрытие изобретения

Задачей изобретения является существенное повышение чувствительности волоконно-оптической гидроакустической антенны.

30

Технический результат достигается за счет того, что сверхчувствительная гидроакустическая антенна на основе волоконно-оптических гидрофонов состоит из двух соединенных между собой частей: вневодной части, находящейся на судне или на

35 берегу, в виде блока обработки информации, и подводной части, включающей в себя последовательно соединенные лазер, волоконно-оптический разветвитель  $1 \times N$  излучения - на  $N$  каналов, делящий энергию излучения в равных долях на гидрофоны, где  $N$  - количество гидрофонов в антенне. Каждый гидрофон состоит из волоконно-оптического разветвителя  $1 \times 2$ , делящего излучение пополам в равном соотношении в волокна

40 опорного и чувствительного плеч интерферометра, намотанных каждое на свои сердечники, при этом волокно опорного плеча намотано на твердый, не подвергающийся изменениям под воздействием внешнего акустического давления сердечник, а волокно чувствительного плеча намотано на эластичный сердечник, дополнительно усиливающий внешнее акустическое давление на свое волокно для большей чувствительности. На

45 конце каждого волокна опорного и чувствительного плеч интерферометра установлены коллиматоры. Их выходные коллимированные пучки попадают на суммирующую полупропускающую пластинку. После полупропускающей пластинки ее суммарное излучение регистрируется многоэлементным приемником гидрофона. Далее выходные

сигналы N гидрофонов поступают на устройство временного мультиплексирования, единый выход которого связан волоконно-оптическим кабелем с блоком обработки информации во вневводной части.

Перечень чертежей

5 На фиг. 1 представлена схема предлагаемого устройства.

На фиг. 2 представлен экспериментальный график шума интерференционного датчика с многоэлементным приемником.

Осуществление изобретения

10 На фиг. 1 представлена схема предлагаемого устройства. Устройство содержит лазер 1 с мощностью, достаточной для разделения излучения на N каналов, оптический разветвитель  $1 \times N$ , где N - количество каналов, т.е. количество гидрофонов в антенне. Каждый канал содержит волоконно-оптический разветвитель  $1 \times 2$  3, чувствительное плечо 4 и опорное плечо 5, намотанные каждое на свои катушки, коллиматоры 6 для излучения от каждого из плеч, полупропускающую пластинку 7 и многоэлементный  
15 приемник 8. Устройство временного мультиплексирования 9, блок обработки информации 10. Устройство состоит из подводной части (подводной муфты) и вневводной (береговой или установленной на судне) части. К вневводной части относится блок обработки информации 10, к подводной - остальные компоненты.

Узкополосный лазер 1 последовательно соединен с волоконно-оптическим  
20 разветвителем  $1 \times N$  излучения 2, делящим энергию излучения в равных долях. Лазер 1 выбран таким образом, чтобы разделенного на N каналов излучения было достаточно для корректной работы (достаточного отношения сигнал/шум) каждого канала. Каждый канал, начинающийся сразу после волоконно-оптического разветвителя  $1 \times N$  излучения 2, состоит из разветвителя  $1 \times 2$  3, делящего излучения на опорное 5 и чувствительное 4  
25 плечи в соотношении 50% на 50%. Длины опорного 5 и чувствительного 4 плеч интерферометра одинаковы. Опорное плечо 4 намотано на твердый, не подвергающийся изменениям под воздействием акустического давления сердечник (катушку). Чувствительное плечо 5 намотано на эластичный сердечник (катушку), усугубляющую акустическое давление на волокно для большей чувствительности. Материалы  
30 сердечников могут быть, например: опорного - металл или другой неупругий материал, эластичного - резина. Сразу после и опорного 5, и чувствительного 4 плеч интерферометра на конце каждого из плеч установлен коллиматор 6, коллимирующий оптический пучок, сформированный в этих плечах. Оба пучка попадают на полупропускающую пластинку 7, после которой суммарное излучение регистрируется  
35 многоэлементным приемником 8 (например, ПЗС-матрица).

Многоэлементные приемники используются для повышения чувствительности каждого отдельного гидрофона и, как следствие, самой гидроакустической антенны. Полученный сигнал с каждого приемника попадает на устройство временного мультиплексирования 9, сводящее N каналов обратно в один канал (один оптический  
40 кабель). По одному оптическому кабелю от устройства временного мультиплексирования 9 информация передается до блока обработки информации 10, где производятся демультимплексирование сигнала, а также расчеты и математические преобразования.

При наличии подводных объектов в зоне чувствительности антенны акустические  
45 сигналы, производимые объектами, регистрируются за счет изменения сигнала на многоэлементном приемнике 8. Изменение сигнала происходит за счет того, что акустическая волна не производит никаких воздействий на сердечник (катушку), на который намотано опорное плечо 5, но производит изменения эластичного сердечного

(катушки) чувствительного плеча 4. Это изменение вызывает сдвиг фазы в волокне, намотанном на этот сердечник (катушку), имеющий следующий вид:

$$\Delta\varphi = 2\pi \frac{\Delta}{\lambda},$$

где  $\Delta$  - соответствующее изменение длины волокна,  $\lambda$  - длина волны излучения лазера.

Из формулы видно, сдвиг фазы прямо пропорционален изменению длины волокна, которое, в свою очередь, зависит от общей длины волокна, намотанного на сердечник.

Суммарная интенсивность излучения от чувствительного и опорного плеч интерферометра после полупропускающей пластинки на приемнике будет выражаться в виде:

$$I_{\Sigma} = (E_{оп} + E_{\varphi})(E_{оп} + E_{\varphi})^* = (I_{оп} + I_{\varphi})[1 + \alpha \cos(\Phi_{\varphi} - \Phi_{оп})],$$

где  $E_{оп}$  и  $E_{\varphi}$ ,  $\Phi_{\varphi}$  и  $\Phi_{оп}$  - мгновенные амплитуды и фазы опорной и чувствительной волн соответственно, знак \* обозначает комплексное сопряжение,  $\alpha$  - видность (контраст) интерференционной картины, при этом  $\Phi_{\varphi} - \Phi_{оп} = \Delta\varphi$ .

Чувствительность каждого отдельного гидрофона и антенны в целом повышается за счет использования коллиматоров 6 и многоэлементного приемника 8. Это объясняется тем, что при обычном сведении пучков внутри волокна (например, через обычный волоконно-оптический разветвитель) в плоскости приемника не будут видны колебания интерференционной картины, в то время как в предложенном техническом решении за счет сведения пучков не в волокне, а используя коллиматоры 6 и полупропускающую пластинку 7, в плоскости многоэлементного приемника 8 будет наблюдаться изменяющаяся интерференционная картина, анализ которой в блоке обработки информации 10 с большей точностью позволит определять колебания фазы волокна в чувствительном плече 4 интерферометра.

Эффект повышения чувствительности можно продемонстрировать разницей типов картин, регистрируемых многоэлементным приемником и обычным одноплощадочным (или одноэлементным) фотодиодом. Отличие проявляется в следующем:

- в случае использования одноплощадочного фотодиода погрешность регистрации фазы зависит от правильного выбора приемного тракта, которым регистрируется сигнал, аналого-цифрового преобразователя (АЦП) (его разрядностью, диапазоном измерения напряжений) и рабочей точки. При выборе приемников и АЦП высокого качества можно достичь погрешности измерения фазы порядка сотни микрорадиан

$$(\delta\varphi \cong 100 \text{ мкрад}/\sqrt{\text{Гц}}) \text{ (см. статью Kim H.S. et al. Noise Properties}$$

of Dual Mach-Zehnder Interferometers employing Narrowband Fiber ASE Sources // Proc. OFS. - 1999. - Т.1);

- в предлагаемом решении для определения фазы используют интерференцию в плоскости многоэлементного (многоплощадочного) приемника, для которого минимальная погрешность будет определяться из других соображений, а именно из количества точек (пикселей матрицы), приходящихся на период (ширину) интерференционной полосы. От этого количества зависит точность определения диаметра интерференционного кольца, а также текущее местоположение дуги этого интерференционного кольца. При возрастании количества пикселей матрицы, приходящихся на ширину интерференционной полосы, можно говорить об увеличении

числа приемников этого сигнала, что приведет к усреднению измеренных значений сигнала и, как следствие, к повышению чувствительности датчика.

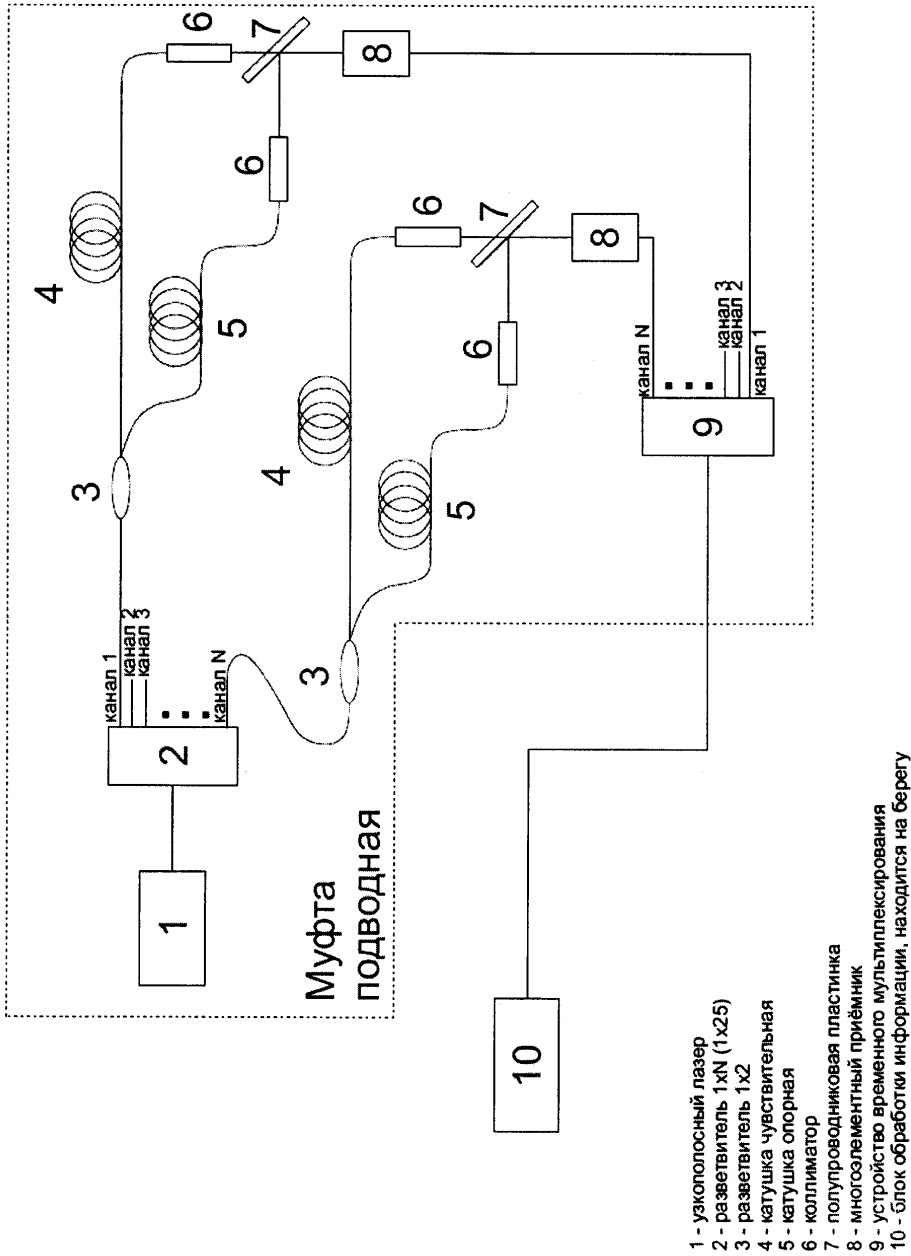
В статье В.Е. Карасик, В.Л. Толстогузов Пороговая чувствительность интерференционного датчика линейного перемещения с многоэлементным приемником // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Современные проблемы оптотехники. М.: Изд-во МГТУ. 2012, представлен экспериментальный график шума со среднеквадратическим отклонением (СКО)  $\sim 0,0119$  нм - см. фиг. 2 - график шума интерференционного датчика IDS-4-LD с многоэлементным приемником в установке ИЛП-1 с длиной волны лазера  $\lambda=650$  нм. Из этого графика при пересчете из СКО в погрешность определения фазы (чувствительность по фазе) с учетом частоты экспериментальных измерений получим величину  $\delta\phi=1,14$  мкрад/ $\sqrt{\text{Гц}}$ , что во много раз меньше по сравнению с аналогичным параметром приемного одноплощадочного фотодиода. С учетом этого предложенное техническое решение антенны с применением многоэлементных приемников в волоконно-оптических гидрофонах позволит существенно повысить чувствительность волоконно-оптической гидроакустической антенны посредством значительного снижения величины акустического давления, эквивалентного шуму.

Данное техническое решение испытано в подсистеме сейсморазведки волоконно-оптической донной антенной, разработанной при выполнении в МГТУ им. Н.Э. Баумана опытно-конструкторской работы по Государственному контракту №15411.1879999.09.026 по заказу МИНПРОМТОРГ РФ, в качестве замены существующих промышленных сейсмоакустической кос на точечных пьезоэлектрических акустических датчиках.

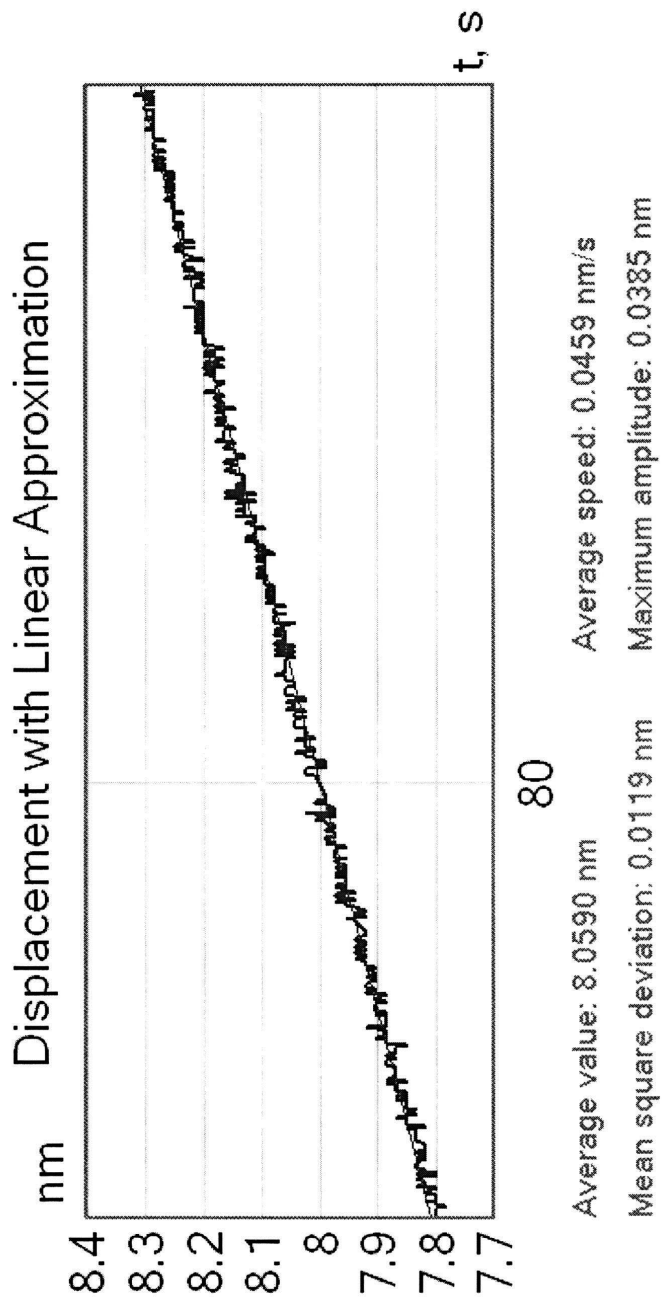
#### (57) Формула изобретения

Сверхчувствительная гидроакустическая антенна на основе волоконно-оптических гидрофонов, включающая в себя две соединенные между собой части: вневодную часть, находящуюся на судне или на берегу, состоящую из блока обработки информации, и подводную часть, включающую в себя последовательно соединенные лазер, волоконно-оптический разветвитель  $1 \times N$  излучения, делящий энергию излучения в равных долях на гидрофоны, где  $N$  - количество гидрофонов в антенне; каждый гидрофон состоит из волоконно-оптического разветвителя  $1 \times 2$ , делящего излучение в равном соотношении в волокна опорного и чувствительного плеч интерферометра, намотанных каждое на свои сердечники, при этом волокно опорного плеча намотано на твердый, не подвергающийся изменениям под воздействием акустического давления сердечник, а волокно чувствительного плеча намотано на эластичный сердечник, дополнительно усиливающий акустическое давление на свое волокно для большей чувствительности; на конце каждого волокна опорного и чувствительного плеч интерферометра установлены коллиматоры с возможностью попадания их коллимированных пучков на полупропускающую пластинку и после полупропускающей пластинки с возможностью регистрации ее суммарного излучения многоэлементным приемником гидрофона, далее с возможностью поступления выходных сигналов  $N$  гидрофонов на устройство временного мультиплексирования, которое связано волоконно-оптическим кабелем с блоком обработки информации во вневодной части.





Фиг. 1



Фиг.2