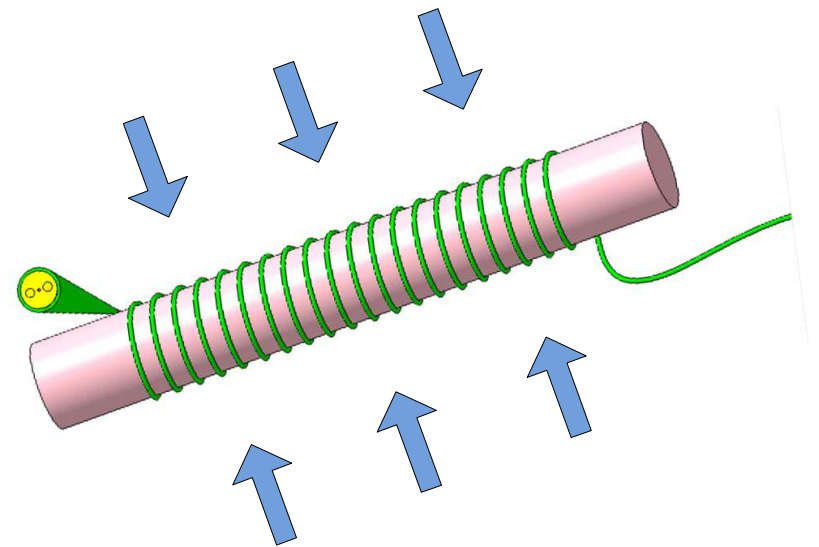


А.В. Куликов
ВОЛОКОННЫЕ АКУСТООПТИЧЕСКИЕ
АНТЕННЫ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

А.В. Куликов

**ВОЛОКОННЫЕ АКУСТООПТИЧЕСКИЕ
АНТЕННЫ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ**

Учебное пособие

 УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Санкт-Петербург

2015

А.В. Куликов, Волоконные акустооптические антенны и их применение.
– СПб: Университет ИТМО, 2015. – 42 с.

В рамках учебного пособия изучены теоретические и технологические основы создания волоконно-оптических акустических сенсоров и волоконных акустооптических антенн. Рассмотрены основные интерферометрические схемы построения волоконно-оптических акустических сенсоров, представлены методы их мультиплексирования для создания протяженных массивов. Дан обзор применению волоконных акустооптических антенн для мониторинга состояния и охраны протяженных объектов, а также для проведения сейсмической разведки. Учебное пособие рекомендовано для магистров, обучающихся по направлению 11.04.02 «Нанотехнологии в волоконной оптике», отдельные разделы могут быть рекомендованы для бакалавров, обучающихся по направлению 11.02.02 «Оптические системы и сети связи». Рекомендовано к печати Ученым советом факультета инфокоммуникационных технологий 22 июня 2015 года, протокол № 7/15.



Университет ИТМО – ведущий вуз России в области информационных и фотонных технологий, один из немногих российских вузов, получивших в 2009 году статус национального исследовательского университета. С 2013 года Университет ИТМО – участник программы повышения конкурентоспособности российских университетов среди ведущих мировых научно-образовательных центров, известной как проект «5 в 100». Цель Университета ИТМО – становление исследовательского университета мирового уровня, предпринимательского по типу, ориентированного на интернационализацию всех направлений деятельности.

© Университет ИТМО, 2015

© А.В. Куликов, 2015

Оглавление	
Предисловие	4
Глава 1. Волоконные акустооптические антенны на основе интерферометров Маха-Цендера	
1.1. Волоконно-оптический акустический сенсор на основе интерферометра Маха-Цендера	5
1.2. Мультиплексирование волоконно-оптических акустических сенсоров на основе интерферометров Маха-Цендера	6
Глава 2. Волоконные акустооптические антенны на основе интерферометров Майкельсона	
2.1. Волоконно-оптический акустический сенсор на основе интерферометра Майкельсона	12
2.2. Мультиплексирование волоконно-оптических акустических сенсоров на основе интерферометров Майкельсона	13
Глава 3. Волоконные акустооптические антенны на основе интерферометров Саньяка	
3.1. Волоконно-оптический акустический сенсор на основе интерферометра Саньяка	16
3.2. Майкельсона Мультиплексирование волоконно-оптических акустических сенсоров на основе интерферометров Саньяка	17
Глава 4. Волоконные акустооптические антенны на брэгговских решетках	
4.1. Волоконно-оптический акустический сенсор на основе интерферометра Фабри-Перо	21
4.2. Волоконные акустооптические антенны на основе метода регистрации спектрального отклика брэгговских решеток	21
4.3. Волоконные акустооптические антенны на основе массива интерферометрических датчиков на брэгговских решетках	26
Глава 5. Применение волоконных акустооптических антенн	
5.1. Рынок волоконных акустооптических антенн	29
5.2. Волоконно-оптические гидроакустические антенны	29
5.3. Применение волоконных акустооптических антенн для трубопроводного транспорта	32
5.4. Волоконные акустооптические антенны для мониторинга состояния и охраны железнодорожных путей	33
5.5. Иные применения волоконных акустооптических антенн	34
Список использованной литературы	36
Список сокращений	39

Предисловие

В настоящее время протяженные системы измерений и контроля на основе волоконно-оптических датчиков получают все более широкое распространение. Эта тенденция обусловлена рядом существенных преимуществ волоконно-оптических сенсоров над традиционными датчиками – они обладают высокой чувствительностью, большим динамическим диапазоном, повышенной надежностью, коррозионной стойкостью, нечувствительностью к электромагнитному воздействию, взрыво- и пожаробезопасностью, кроме того, они пригодны к эксплуатации в условиях повышенной температуры, влажности и давления и имеют улучшенные физические характеристики (малый вес и объем).

Подобные сенсорные системы разрабатывались в течение последних десятилетий для систем охраны периметра, контроля состояния трубопроводов, для разведки полезных ископаемых, геофизических исследований, а также для гидроакустических систем различного назначения - как в военных целях (волоконно-оптические гидроакустические антенны), так и для гражданского применения (морские донные и буксируемые сейсмические кося).

В зависимости от измеряемых параметров, в основу функционирования волоконно-оптических сенсорных систем могут быть положены различные физические эффекты.

На протяжении многих лет различные интерферометрические схемы предлагались и исследовались для гидрофонных систем и волоконных массивов. В настоящее время волоконные акустооптические сенсоры строятся на основе четырех основных интерферометрических схем: интерферометре Маха-Цендера, интерферометре Майкельсона, интерферометре Саньяка и интерферометре Фабри-Перо, который обычно формируется в оптическом волокне с использованием брэгговских решеток. В случае протяженных волоконных акустооптических антенн, регистрирующих звуковые сигналы в определенном диапазоне частот предпочтительно использование распределенных датчиков на основе волоконных брэгговских решеток (ВБР), которые представляют собой индуцированное изменение показателя преломления оптического волокна. Принцип действия подобных систем основан на изменении длины оптического пути между брэгговскими решетками под действием акустического давления, которое регистрируется высокочувствительными интерферометрическими методами.

Перечисленные выше преимущества волоконно-оптических датчиков делают привлекательным создание распределенных волоконных акустооптических антенн на их основе.

Глава 1. Волоконные акустооптические антенны на основе интерферометров Маха-Цендера

1.1. Волоконно-оптический акустический сенсор на основе интерферометра Маха-Цендера

Одной из самых распространенных интерферометрических схем, используемых в волоконных массивах датчиков, является схема на основе интерферометра Маха-Цендера. В конфигурации, показанной на рис. 1, свет из лазера делится на два пучка первым волоконным ответвителем, один из них входит в чувствительное плечо, а другое в опорное плечо. В случае одиночного сенсора, чувствительный элемент представляет собой чувствительное плечо, погруженное в среду («сырой» конец, затененная область на рис. 1). Опорное плечо (и задержка или балансировка катушки, если они имеются) обеспечивает опорную фазу («сухой» конец). В выходном конце второго волоконного ответвителя эти два пучка объединяются и посылаются на фотодетектор, который регистрирует изменение интерференционной картины. При этом восстанавливаются фазовые изменения чувствительного пучка.

Эта конфигурация имеет две особенности [1]:

- нестабильность рабочей точки интерферометра;
- любые фазовые шумы приводят к изменению интенсивности регистрируемого светового сигнала.

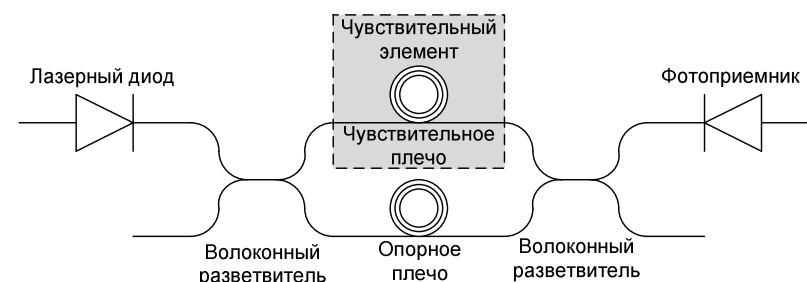


Рис. 1. Схематичное изображение волоконно-оптического акустооптического сенсора на основе интерферометра Маха-Цендера

Имеются две основные конфигурации волоконных акустооптических сенсоров на основе интерферометра Маха-Цендера: сбалансированная и несбалансированная [1]. В сбалансированной схеме, сигнальное плечо и опорное плечо почти одинаковы. Для схемы Маха-Цендера, показанной на рисунке 1, баланс оптических путей плеч интерферометра может быть достигнут выбором длины опорного плеча. Эта схема широко распространена, поскольку обычно не чувствительна к фазовому шуму светового источника и не требует источников с большой длиной

когерентности (узкополосных лазерных диодов). В несбалансированной схеме длины оптических плеч различны, и она несколько проще. Некоторые методы демодуляции, такие как phase-generated carrier (PGC), требуют существенных различий оптических длин путей в интерферометре Маха-Цендера. Недостатком несбалансированной схемы является то, что в этом случае необходимо использование источника светового излучения с большой длиной когерентности.

1.2. Мультиплексирование волоконно-оптических акустических сенсоров на основе интерферометров Маха-Цендера

В этом типе массивов волоконные акустооптические сенсоры мультиплексируются в общей волоконной паре, с использованием лестничной топологии, как показано на рисунке 2, и временного мультиплексирования (TDM – time division multiplexing) [2,3]. Каждое из колец лестницы содержит волоконный акустооптический сенсор на основе интерферометра Маха-Цендера, описанного выше.

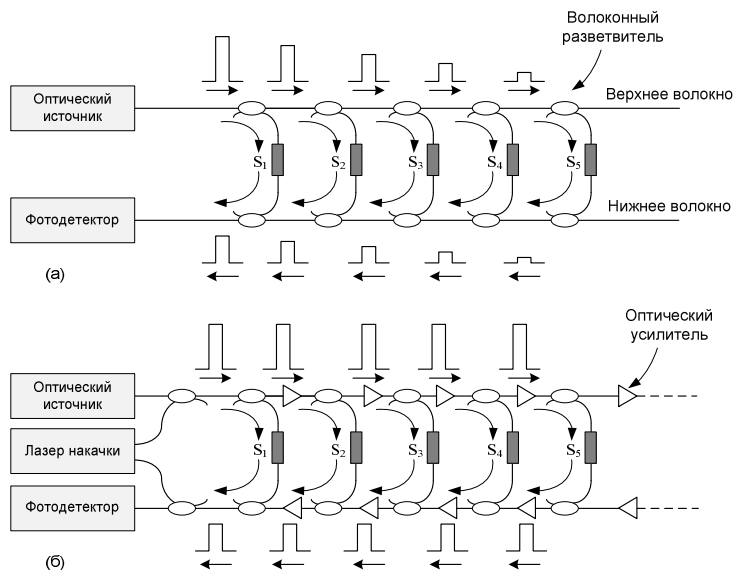


Рис. 2. Массив волоконно-оптических сенсоров на интерферометрах Маха-Цендера: а) полностью пассивный, б) с оптическими усилителями

Сигнальный импульс из оптического источника распространяется по верхней (или распределяющей) волоконной шине до первого ответвителя, который отводит часть энергии импульса на первый интерферометр Маха-Цендера. Амплитудно-модулированный сигнал, поступающий из этого интерферометра, делится вторым ответвителем на нижней (возвращающей) шине, которая передает сигнал к фотодетектору. Оставшаяся часть сигнала

по шине распределения идет ко второму интерферометру, где так же происходит деление мощности светового сигнала. Таким образом, эта топология возвращает последовательность импульсов, каждый из которых проходит через один сенсор и модулируется акустической волной. Импульс из первого сенсора возвращается первым, импульс из последнего – последним.

Немедленно после возвращения последнего импульса источник запускает второй входящий импульс в шину распределения – это необходимо для получения максимальной частоты дискретизации. Чтобы избежать временного перекрытия между соседними возвращающимися импульсами, что вызвало бы нежелательные перекрестные помехи между датчиками, входной импульс выбирается более узким, чем время распространения между соседними сенсорами [3].

Подобные пассивные сенсоры ограничены в числе датчиков, которые могут быть мультиплексированы на волоконной паре из-за потерь деления во время прохождения через большое число ответвителей. Число сенсоров на волокно может быть максимизировано путем выбора коэффициента деления ответвителей, но даже после оптимизации такое пассивное мультиплексирование может поддерживать лишь 10-20 датчиков на волоконную пару. На рис. 3 показано смоделированное отношение сигнал/шум сигнала, возвращающегося от последнего датчика, в зависимости от количества датчиков. Отсюда видно, что для приемлемого отношения сигнал/шум в случае наличия 1000 датчиков необходимо 100 оптических волокон, что неприемлемо для реальных гидроакустических систем.

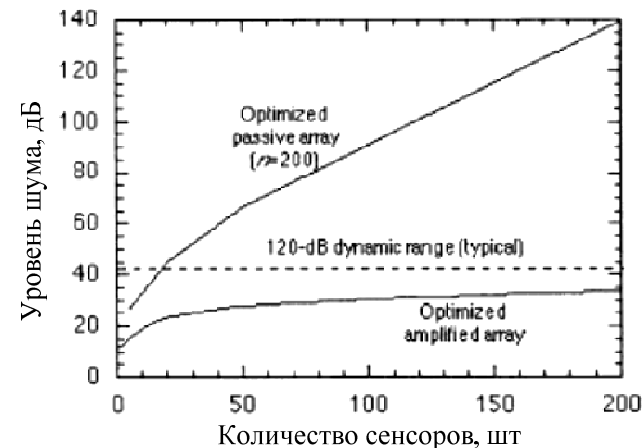


Рис. 3. Зависимость шума от числа сенсоров для пассивного и активного массива сенсоров с волоконными усилителями

В случае использования интерферометров Маха-Цендера требуют внимания и некоторые другие обстоятельства. Так, для максимальной чувствительности каждый интерферометр должен быть смещен в рабочую точку на $\pi/2$. В это же время, все датчики будут подвергаться изменению температуры и давления. Причем это влияние на каждый датчик будет случайным, что ведет к периодическим потерям интерференционного сигнала.

Решение этой проблемы возможно при использовании несбалансированных интерферометров и модуляции частоты входящего сигнала, а затем демодуляции возвращающегося сигнала. Этот подход хорошо работает, хотя и увеличивает сложность обрабатывающей электроники. Кроме того, несбалансированные интерферометры Маха-Цендера вызывают преобразование фазового шума источника в шумы интенсивности. Часто, эти шумы являются преобладающими на низких частотах, так что для получения приемлемой чувствительности на частотах ниже 1 кГц, необходимо использование лазеров с узкой спектральной шириной полосы излучения, что достаточно дорого [3].

В дополнение к этому, необходимо контролировать состояние поляризации интерферирующих импульсов – в противном случае будет иметь место потеря интерференционного сигнала, поскольку, как известно, световые волны с двумя ортогональными поляризациями не интерферируют.

Компенсация потерь деления может быть достигнута за счет использования волоконных оптических усилителей. Они могут использоваться для усиления светового сигнала как до введения света в массив волоконных акустооптических сенсоров, так и после получения световых сигналов. Этот способ хорошо работает, но существенное увеличение числа датчиков требует высоких входных мощностей, вводимых в волокно, что неизбежно приводит к проявлению нелинейных эффектов, ограничивающих максимальное число сенсоров. Гораздо лучшим решением в этом случае является использование множества оптических усилителей, размещенных перед и после каждого интерферометра Маха-Цендера на оптических волокнах (см. рис. 2b). Причем коэффициент усиления каждого усилителя выбирается таким, чтобы полностью компенсировать потери оптического излучения до следующего усилителя. При использовании множества усилителей, все датчики посылают на фотоприемник одинаковые по мощности световые сигналы с одинаковым отношением сигнал/шум. Все усилители могут накачиваться удаленно через основные оптические волокна с помощью лазеров накачки, расположенных перед концом массива (см. рис. 2b).

Поскольку каждый из усилителей обладает сравнительно небольшим коэффициентом усиления, то и вносимые ими шумы будут достаточно низкими, что, в конечном счете, значительно улучшит отношение сигнал/шум такой системы и позволит объединить большее число сенсоров на одной волоконной паре (см. рис 3) [3].

Еще большей чувствительности и снижения шума можно достигнуть, размещая в каждом кольце массива не одиночные сенсоры, а подмассив пассивных сенсоров (рис. 4).

Существует оптимальное число сенсоров, размещаемых в каждом кольце [3]. Это обусловлено двумя факторами: когда число датчиков на кольцо слишком низкое – необходимо использовать слишком много оптических усилителей, дающих большой шум, а когда число датчиков на каждое кольцо слишком велико – слишком велики потери на деление оптической мощности. Так, для 320 датчиков, оптимальным является размещения 13 сенсоров на каждой ступеньке.

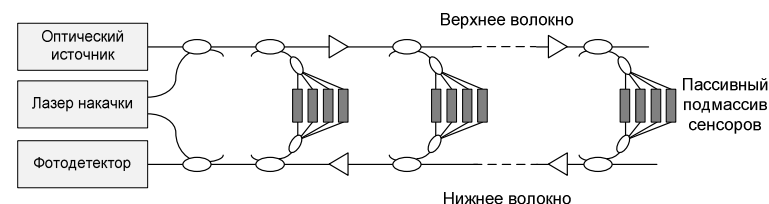


Рис. 4. Конфигурация массива на основе интерферометров Маха-Цендера с использованием пассивных подмассивов датчиков с обратной связью

Интересной вариацией данной топологии является топология с прямой связью (см. рис. 5). В этом случае световые импульсы подаются из конца массива и распространяются назад, к передней части массива. Основным преимуществом данной топологии является то, что каждый световой сигнал проходит через одинаковое количество усилителей и ответвителей, и одинаковую длину волокна, испытывая одинаковые потери и усиление. Более того, в системе с обратной связью (рис. 4) вариации в коэффициентах усиления накапливаются, и сигналы, возвращающиеся от разных датчиков, могут быть неодинаковыми. С использованием топологии с прямой связью эти отличия в коэффициентах усиления, как правило, гасятся, и пришедшие сигналы имеют практически одинаковую мощность.

Все вышеперечисленные основные топологии могут быть существенно расширены в размерах при использовании стандартных схем спектрального мультиплексирования WDM (Wavelength Division Multiplexing) [3].

Массив датчиков на основе топологии с прямой связью был продемонстрирован Naval Research Laboratory (NRL) [4]. Единственным отличием от схемы (рис. 5) явилось использование не большого числа усилителей с малым коэффициентом усиления, а двух EDFA – усилителей с большими коэффициентами усиления, один из них использовался как преусилитель, а другой как конечный усилитель.

Этот подход позволил существенно уменьшить число усилителей и цену массива. Массив состоял из 64 датчиков, равномерно распределенных среди 8 подмассивов. 50 км волокна были добавлены в конец идущего к фотоприемнику волокна для демонстрации удаленности работы. На вход

массива подавались оптические импульсы с мощностью 100 мВт. Однородность уровней мощности возвращающихся к фотоприемнику световых импульсов колебалась в пределах 1 дБ..

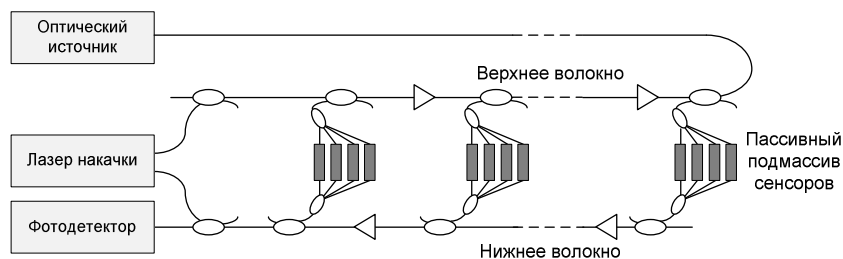


Рис. 5. Массив волоконных акустооптических сенсоров на основе топологии с прямой связью

Между 5 Гц и 7 кГц чувствительность массива была ограничена фазовым шумом лазера на уровне порядка $200 \text{ мкрад/Гц}^{1/2}$.

Данная схема была впоследствии расширена до 96 датчиков с использованием эрбиевого усилителя с удаленной накачкой (RPEDFA) [5].

Демонстрация схемы массива сенсоров с использованием большого числа усилителей была осуществлена Стэнфордским университетом (Stanford University) [6]. Разработанный массив содержал 10 колец и 20 усилителей и имел конфигурацию, показанную на рис. 1.2b.

В качестве усилителей использовались короткие отрезки оптического волокна, легированного эрбием, а в качестве накачки использовался Nd:YAG лазер с длиной волны $\lambda = 1024 \text{ нм}$, его мощность составляла $\sim 1 \text{ Вт}$. Световые импульсы от источника излучения имели длительность $\sim 50 \text{ нс}$ (1.8 МГц) на длине волны 1550 нм и мощность $\sim 200 \text{ мкВт}$. Все WDM ответвители отводили 65% от мощности на длине волны сигнала и 0% на длине волны накачки. Расстояние между кольцами составляло 5,5 м. Потери на делении (35%) и дополнительные вносимые потери в сумме давали порядка 5 дБ для одного ответвления.

Сравнение уровня шумов массива сенсоров с усилением и пассивного (оптимизированного по коэффициентам деления ответвителей) массива в зависимости от числа используемых колец приведено на рисунке 6:

Массив на основе усилителей имеет на 12 дБ лучшее отношение сигнал/шум. Уровень собственных шумов такого массива сенсоров составил порядка $\sim 5.7 \text{ мкрад/Гц}^{1/2}$.

Подобные массивы датчиков на основе интерферометров Маха-Цендера были также успешно опробованы при исследовании нефтяных месторождений в Калифорнии [7,8].

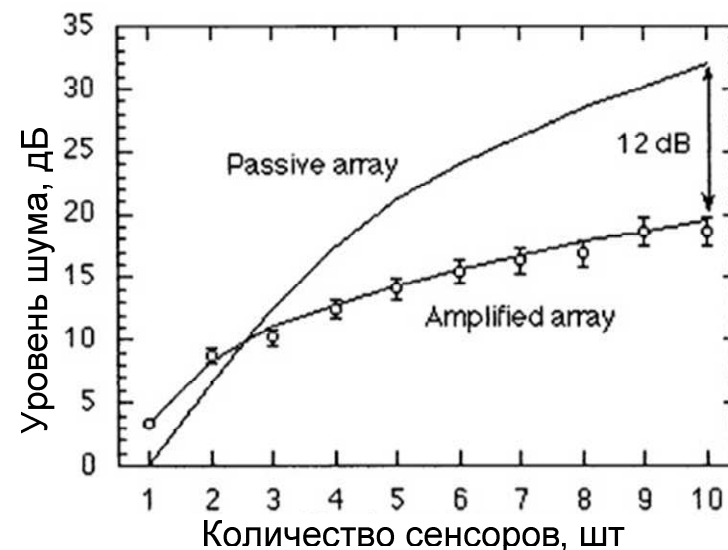


Рис. 6. Зависимость уровня шума от количества используемых в массиве сенсоров колец для двух типов массивов

Глава 2. Волоконные акустооптические антенны на основе интерферометров Майкельсона

2.1. Волоконно-оптический акустический сенсор на основе интерферометра Майкельсона

Как показано на рис. 7, интерферометр Майкельсона является по существу сложным интерферометром Маха-Цендера с парой зеркал, отражающих сигнал [3]. В нем также имеются два плеча – сигнальное и опорное. Акустическое воздействие изменяет фазу светового сигнала, распространяющегося по сигнальному плечу, вследствие чего на фотодетекторе наблюдается изменяющаяся сообразно акустическому воздействию интерференционная картина. Таким образом, по изменению интерференционной картины оказывается возможным судить о силе акустического воздействия. Такая конфигурация акустооптического сенсора является типичным отражающим типом волоконного датчика, хорошо подходящим для построения отражательного массива сенсоров. Во избежание попадания отраженных сигналов в источник излучения, негативно влияющих на выходную мощность источника, следует использовать оптический изолятор.

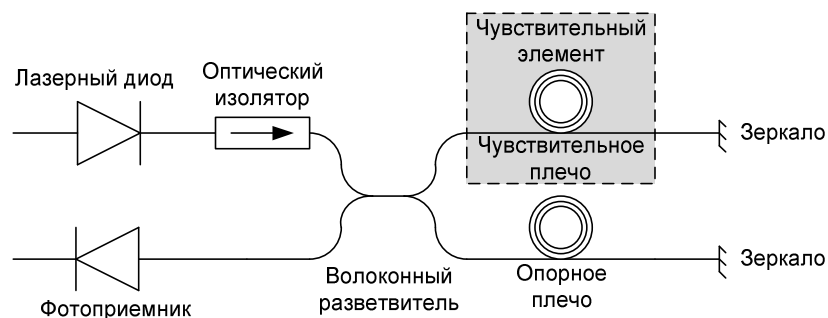


Рис. 7. Схема волоконного акустооптического сенсора, основанного на интерферометре Майкельсона

Интерферометр Майкельсона имеет два важных преимущества над интерферометром Маха-Цендера [1]:

- приемник и источник излучения расположены на одном конце. В этом случае, связь с сигнальным плечом, которое располагается удаленно от «сухого конца» осуществляется только лишь с помощью одного волокна, что принципиально невозможно для интерферометра Маха-Цендера.

- световой пучок проходит через чувствительное плечо дважды, что делает этот тип волоконного акустооптического сенсора теоретически вдвое

более чувствительным, чем волоконный акустооптический сенсор на основе интерферометра Маха-Цендера.

2.2. Мультиплексирование волоконно-оптических акустических сенсоров на основе интерферометров Майкельсона

Одним из примеров разработанных волоконных акустооптических антенн на основе интерферометра Майкельсона является система, представленная в работе [9]. Она состоит из 32 сенсоров, структурная схема одного из них приведена на рисунке 8:

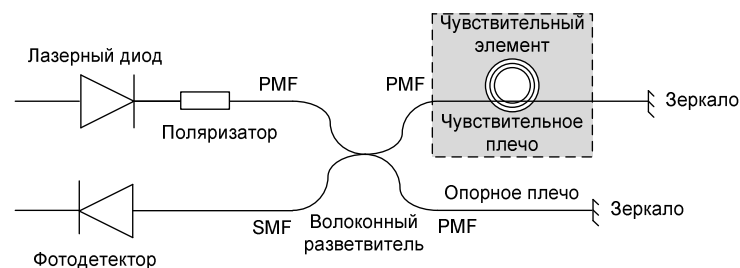


Рис. 8. Структурная схема волоконного акустооптического сенсора на основе интерферометра Майкельсона

В конструкции интерферометра использовано волокно с сохранением поляризации. Линейно поляризованное излучение от PMF polarizer вводится в интерферометр через разветвитель. Оба плеча интерферометра оканчиваются отражающими поверхностями. В системе используется phase generated carrier (PGC) для демодуляции выходной мощности интерферометра. Отличие оптических длин путей между плечами интерферометра (~10 м) необходимо для внесения фазового сдвига для работы PGC. Только с одним разветвителем, размер элемента около 22мм в диаметре и 100 в длину, а акустически чувствительная часть имеет только 40 мм в длину.

Тестирование акустооптических сенсоров производилось в частотном диапазоне от 83 Гц до 1250 Гц. Чувствительность сенсоров в зависимости от частоты представлена на рисунке 9.

Она оказалась равной около -158 дБ отн. (0дБ = 1 рад/мкПа) в этом частотном диапазоне с флуктуациями менее чем ±1.5дБ. Тестирование чувствительности датчика к температурным воздействиям исследовалась в температурном диапазоне от 0 до + 50 °С, было установлено, что флуктуации акустической чувствительности не превышают ±2 дБ.

Также проводилось сравнение настоящего акустооптического сенсора со стандартным пьезоэлектрическим гидрофоном – результаты приведены на рисунке 10.

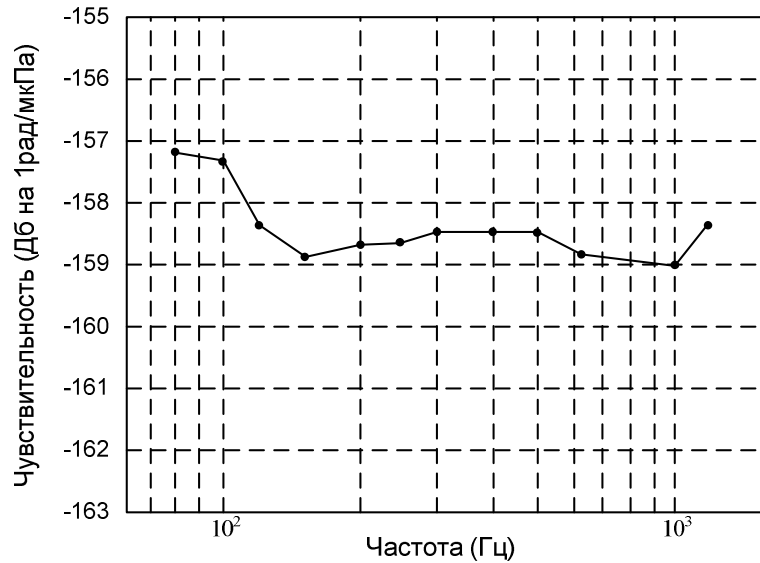


Рис. 9. Чувствительность волоконного акустооптического сенсора в зависимости от частоты в частотном диапазоне 83 – 1250 Гц

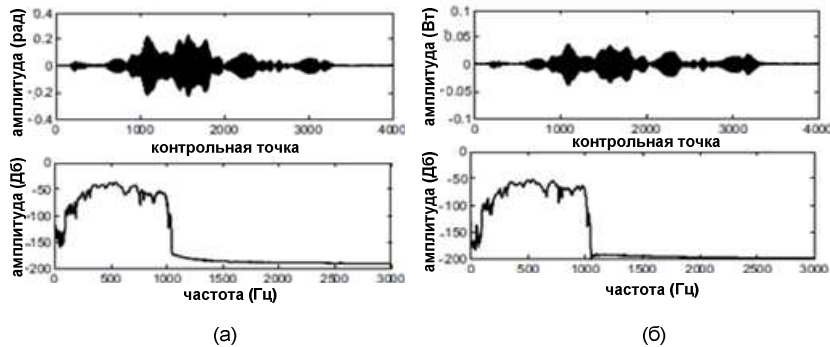


Рис. 10. Сравнение работы волоконного акустооптического сенсора на интерферометре Майкельсона (а) и пьезоэлектрического гидрофона (б)

Из этого рисунка видно, что волоконный акустооптический сенсор имеет очень схожую передаточную характеристику по сравнению с пьезоэлектрическим гидрофоном при детектировании широкополосного сигнала. Сконструированная на основе 32 таких волоконно-оптических сенсоров гидроакустическая система была успешно опробована, показав аналогичную чувствительность.

Интерферометрическая схема Майкельсона лежит также в основе системы акустического контроля морских портов CENTURION, разрабатываемой Northrop Grumman [10]. Принципиальная схема объединения волоконных акустооптических сенсоров на основе интерферометров Майкельсона приведена на рисунке 11:

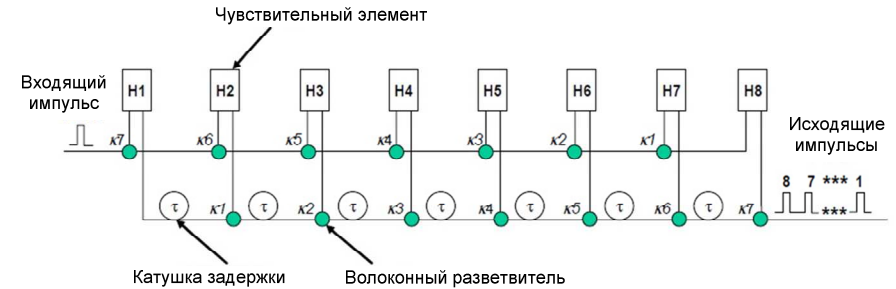


Рис. 11. Структурная схема массива сенсоров на основе TDM

Объединение акустооптических сенсоров в массив в этой схеме осуществляется на основе временного мультиплексирования (TDM). Катушки задержки между каждым кольцами лестницы необходимы для того, чтобы импульсы от каждого датчика не перекрывались на выходе системы. Полное количество волоконных акустооптических сенсоров, использующих в системе – 48 штук.

С дальнейшими разработками в направлении мультиплексирования интерферометров Майкельсона можно познакомиться в работе [14].

Глава 3. Волоконные акустооптические антенны на основе интерферометров Саньяка

3.1. Волоконно-оптический акустический сенсор на основе интерферометра Саньяка

В этой конфигурации интерферометра (рис. 12), свет из источника входит в средний порт волоконного ответвителя 3x3 и делится на пучок, движущийся по часовой стрелке (CW пучок), и пучок, движущийся против часовой стрелки (CCW пучок). CCW пучок идет сначала через линию задержки и затем через чувствительную часть сенсора, в то время как CW пучок проходит через чувствительную часть и затем через линию задержки [1]. Из-за несимметричного расположения чувствительной части, фазовые изменения, которые измеряемая величина вносит в чувствительной части сенсора, преобразуются в фазовые отличия между двумя пучками, когда они встречаются в 3x3 ответвителе. Эти фазовые отличия в свою очередь преобразуются в модуляцию интенсивности, при их интерференции в ответвителе.

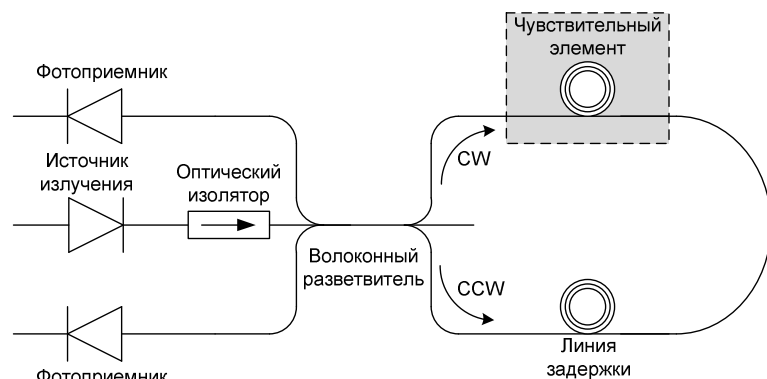


Рис. 12. Схема волоконного акустооптического сенсора на основе интерферометра Саньяка

Волоконные сенсоры на интерферометре Саньяка обладают следующими достоинствами [1]:

- фазовый шум оптического источника не преобразуется в шум интенсивности, как в интерферометре Маха-Цендера;
- можно использовать широкополосный (некогерентный) источник оптического излучения вместо узкополосного лазерного диода.

Необходимо отметить, что схема акустооптического сенсора на основе интерферометра Саньяка обладает существенным недостатком: она слабо чувствительна к низким частотам акустического воздействия.

3.2 Мультиплексирование волоконно-оптических акустических сенсоров на основе интерферометров Саньяка

Основной массива акустических сенсоров на основе интерферометров Саньяка [11], является схема, представленная на рисунке 12. Петля Саньяка этого волоконного сенсора включает в себя катушку задержки и массив чувствительных элементов. Катушка задержки содержит длинное оптическое волокно – более 1 км. Чувствительная часть представляет собой волокно, намотанное на чувствительный сердечник. Длина этого волокна обычно составляет от 10 до 100 м. Свет от источника излучения делится разветвителем 3x3 на пучки, распространяющиеся по часовой стрелке и против часовой стрелки. Пучок по часовой стрелке проходит через катушку задержки первым, затем через волоконный чувствительный элемент, в то время как пучок против часовой стрелки проходит сначала через чувствительный элемент и потом через катушку задержки. За время задержки между прибытием пучков акустический сигнал также вносит фазовую модуляцию в чувствительное волокно. Если изменяющаяся во времени фаза возмущений, вносимая акустической волной, воздействует на петлю асимметрично, то свет, распространяющийся против часовой стрелки прибывает в точку воздействия раньше, чем свет по часовой стрелке, и световые импульсы приобретают различные значения фазы. Это изменение в фазе переходит в разность фаз между встречными пучками, которое преобразуется в модуляцию интенсивности, когда пучки интерферируют в разветвителе 3x3. Более точно, если циклическая частота акустического сигнала Ω вносит фазовую модуляцию $\phi_h \cos(\Omega t)$ в волокно акустооптического сенсора, результирующая фазовая модуляция между интерферирующими пучками в интерферометре $\phi_{int}(t)$ определяется выражением:

$$\phi_{int}(t) = \phi_h \cos(\Omega t) - \phi_h (\Omega(t + T_{delay})) = 2\phi_h \sin\left(\frac{\Omega T_{delay}}{2}\right) \sin\left(\Omega t + \frac{\Omega T_{delay}}{2}\right), \quad (1)$$

где $T_{delay} = L/v$ - это время задержки между прибытием пучков в чувствительную часть, распространяющихся по часовой и против часовой стрелки в петле, v - фазовая скорость света в волокне, L - разница длин путей, проходимых пучками до чувствительной части. Таким образом, амплитуда ϕ_{int} - это функция фазовой модуляции чувствительного элемента ϕ_h и произведения акустической частоты модуляции с циклом задержки по времени. Это основное отличие датчика на основе интерферометра Саньяка от датчика на интерферометра Маха-Цендера или Майкельсона, в которых амплитуда $\phi_{int}(t)$ является функцией только фазовой модуляции чувствительного элемента ϕ_h . Максимальная чувствительность достигается в датчике Саньяка, когда произведение ΩT_{delay} есть нечетное кратное π . Акустическая частота, которая делает это произведение в точности равным π , и которая является наименьшей частотой с наибольшей достижимой

чувствительностью, называется собственной частотой петли. Так для диапазона частот в 10 кГц необходимо время задержки, по крайней мере, в 50 мкс, и, следовательно, длина волокна в катушке задержки как минимум 10 км. Таким образом, волоконные акустооптические сенсоры на основе интерферометров Саньяка требуют большого количества волокна в линии задержки для приема сигналов на частотах ниже 10 кГц [11].

В работе [12] приводится пример реализации акустооптического сенсора на интерферометре Саньяка. Зависимость его чувствительности от частоты акустического воздействия построена на рисунке 13 для двух длин катушек L, равных 20 и 40 км, соответственно.

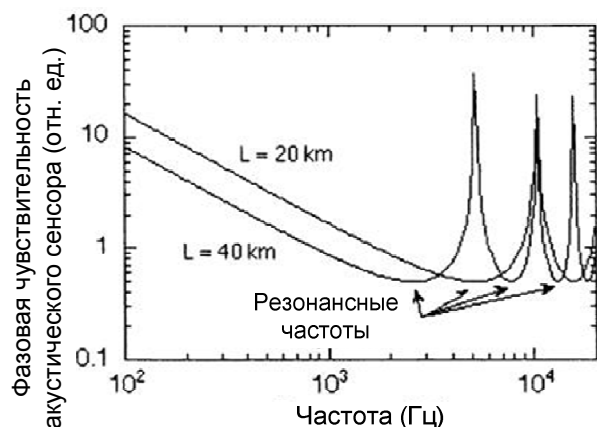


Рис. 13. Частотная зависимость чувствительности сенсора на основе интерферометра Саньяка для длин петли в 20 и 40 км

Первый резонанс имеет место, когда $\Omega T_{delay} / 2 = \pi / 2$. Чтобы этот резонанс был в диапазоне частот, представляющих интерес для построения акустооптических сенсоров, длина катушки должна быть несколько десятков километров. Например, при длине волокна 40 км (с потерями 0.2 дБ/км на длине волны $\lambda = 1550 \text{ нм}$) самый нижний резонанс находится на частоте 2.59 кГц. Ниже этого резонанса отклик уменьшается линейно с частотой, до нулевого отклика постоянного тока. В отличие от этого датчика, чувствительность схем на интерферометре Маха-Цендера и Майкельсона не зависит от частоты и остается высокой вплоть до постоянного тока. Однако для океанских применений низкочастотный спад чувствительности интерферометра Саньяка не так уж важен. Причина в том, что океанские шумы увеличиваются также почти линейно в сторону низких частот. Таким образом, интерферометр Саньяка может регистрировать звуковые колебания на низких частотах, хотя и с меньшей чувствительностью, и это хорошо подходит для регистрации низкочастотных акустических колебаний в море. Кроме того, динамический диапазон Саньяка на низких частотах гораздо

больше, чем у акустооптических сенсоров на интерферометре Маха-Цендера и Майкельсона [12].

За счет вычитания сигнала из двух приемных портов ответвителя 3x3, может быть вычтен избыточный шум источника излучения, который представляет собой шум усиленного спонтанного излучения. Это позволяет сенсору на интерферометре Саньяка работать с чувствительностью, ограниченной лишь дробовым шумом фотоприемника.

Структурная схема массива волоконных акустических сенсоров на основе интерферометров Саньяка представлена на рисунке 14:

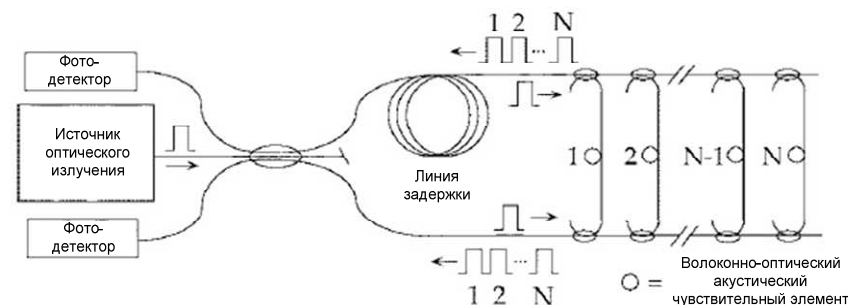


Рис. 14. Структурная схема массива волоконных акустических сенсоров на основе интерферометров Саньяка

Каждое кольцо массива представляет собой одно волокно, намотанное на катушку. Каждый оптический путь, проходящий от ответвителя через катушку задержки, одно из колец массива и возвращающийся к ответвителю, является отдельным интерферометром Саньяка. Таким образом, для N сенсоров имеется N интерферометров Саньяка, каждый из которых ведет себя как одиночный интерферометр, описанный выше (см. рис. 12).

В схеме используется TDM мультиплексирование [11] – источник излучения посылает световой импульс, который после прохождения разветвителя распространяется в двух противоположных направлениях – по направлению и против часовой стрелки. По достижении массива чувствительных элементов импульс, распространяющийся против часовой стрелки, делится на N различных импульсов (длительность импульса выбирается с тем, чтобы смежные импульсы не перекрывались). В это время импульс, распространяющийся по часовой стрелке, еще не достиг массива и распространяется по катушке задержки как одиночный импульс. Когда он достигает массива, то также делится на N импульсов. Затем каждый из импульсов, распространяющихся по часовой стрелке, достигает ответвителя 3x3 и интерферирует с импульсом, распространяющимся по тому же кольцу против часовой стрелки. Импульсы анализируются отдельно для восстановления акустического сигнала, который модулирует их в

соответствующих кольцах массива. Причем время задержки T_{delay} одинаково для всех импульсов.

Если необходимо значительно увеличить число чувствительных элементов массива, необходимо добавить в описанную схему оптические усилители EDFA, как это показано на рисунке 15 [11].

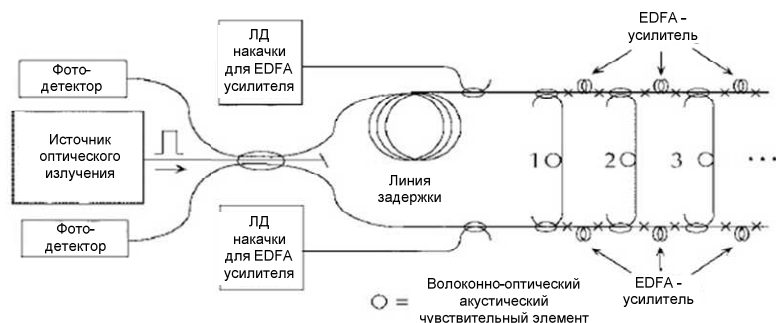


Рис. 15. Схема волоконного массива с использованием оптических усилителей

На рисунке 16 приведена фазовая чувствительность данного массива сенсоров в зависимости от длины волокна на катушке задержки [11].

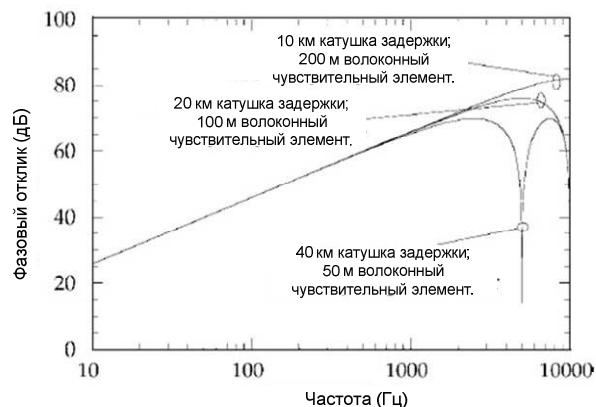


Рис. 16. Фазовая чувствительность массива сенсоров на интерферометрах Саньяка от частоты

На сегодняшний день массивы сенсоров на основе интерферометра Саньяка хорошо изучены, с результатами проведенных исследований можно ознакомиться в работах, посвященных вопросам усовершенствования подобных массивов [15,16] и их применения для регистрации звука и давления [13].

Глава 4. Волоконные акустооптические антенны на брэгговских решетках

4.1. Волоконно-оптический акустический сенсор на основе интерферометра Фабри-Перо

Волоконно-оптический акустический сенсор на основе интерферометра Фабри-Перо имеет структурную схему, показанную на рисунке 17. В этом интерферометре световой сигнал многократно проходит через резонатор, отражаясь от его полупрозрачных зеркал. Выходная мощность светового сигнала такого интерферометра будет максимальной, когда все выходящее пучки будут в фазе, и будет быстро убывать даже от небольшого фазового изменения. Таким образом, малые фазовые изменения, вносимые в полость между полупрозрачными зеркалами, будут приводить к большому изменению интенсивности света на выходе интерферометра [1].

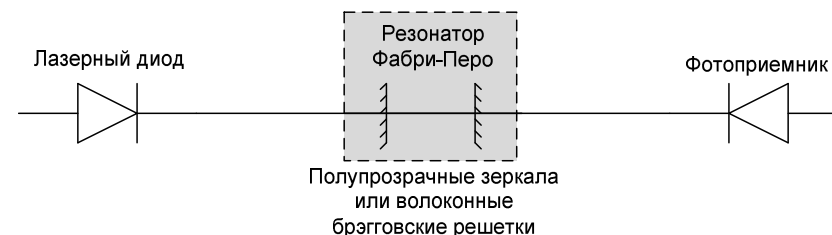


Рис. 17. Схема волоконно-оптического акустического сенсора, основанного на интерферометре Фабри-Перо

Акустооптические сенсоры, основанные на интерферометрах подобного типа, обычно очень компактны – резонатор Фабри-Перо может быть создан из двух торцевых поверхностей сколотого волокна или цельного волокна с парой брэгговских решеток.

4.2. Волоконные акустооптические антенны на основе метода регистрации спектрального отклика брэгговских решеток

На данный момент существует множество схем волоконных акустооптических сенсоров на основе метода регистрации спектрального отклика брэгговских решеток. Волоконная брэгговская решетка (ВБР) представляет собой периодическое изменение показателя преломления в сердцевине волоконного световода вдоль оси распространения оптического излучения. Запись ВБР проводится в специальные фоточувствительные волоконные световоды. Основным свойством брэгговских решеток является возможность отражать световое излучение в узком спектральном диапазоне. Длина волны отражения (брэгговская длина волны) определяется формулой (условием Брэгга первого порядка) [17]:

$$\lambda_B = 2n_{eff} \Lambda, \quad (2)$$

где λ_B - длина волны Брэгга, Λ - период решетки, n_{eff} - эффективный показатель преломления сердцевинки волокна для центральной длины волны.

Существует множество различных способов построения сенсорных систем на основе брэгговских решеток. В простейшем случае сенсорная система представляет собой точечный датчик, соединенный через оптический ответвитель с источником светового сигнала и блоком оптического спектрального анализатора (рис. 18). Сигнал от источника отражается чувствительным элементом, а длина волны отражения фиксируется блоком спектроанализатора.

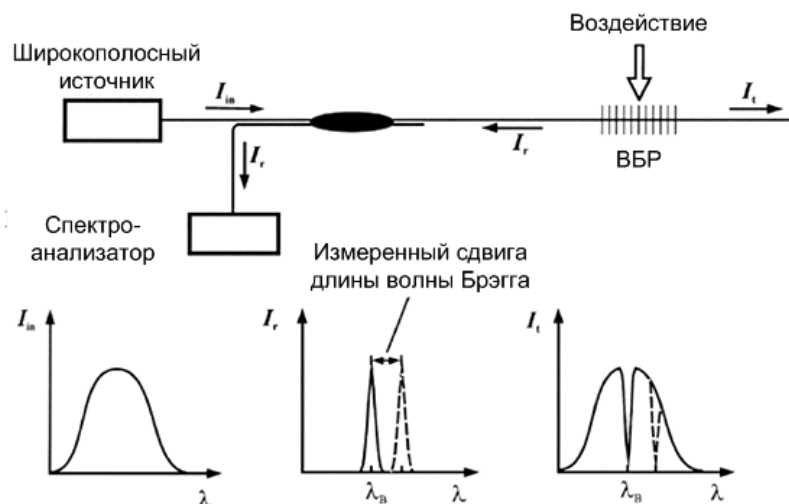


Рис. 18. Схема волоконно-оптического датчика на брэгговских решетках

Как правило, анализатор (Bragg grating interrogator) представляет собой узкополосный спектрометр. Существуют спектрометры различных типов: от стандартных дифракционных, где в качестве дисперсионного элемента используется дифракционная решетка, до анализаторов на основе интерферометра Фабри-Перо.

Одним из основополагающих достоинств волоконно-оптических датчиков является их возможность объединения в массивы (мультиплексирование). Наиболее часто в волоконных датчиках на брэгговских решетках используются два вида мультиплексирования – мультиплексирование по длине волны (Wavelength Division Multiplexing - WDM) и мультиплексирование по времени (Time Division Multiplexing - TDM).

Мультиплексирование по времени TDM основано на анализе скорости прохождения сигнала по системе. Каждый датчик разделен участком волоконного световода, для прохождения которого сигналу требуется определенное, и известное заранее, время. Источник посылает короткий

импульс в систему. Сигнал на выходе представляет собой ряд импульсов, разделенных по времени, каждый из которых несет информацию о состоянии каждого сенсора в отдельности. В чистом виде такая система мультиплексирования также редко используется для объединения брэгговских волоконных датчиков, однако как составная часть более сложной системы встречается довольно часто. Подробное описание данного типа мультиплексирования представлено в работе [18].

Принцип WDM мультиплексирования основывается на том, что каждый сенсорный элемент записывается со своим уникальным периодом решетки, что позволяет различать их по спектру при анализе и, соответственно, фиксировать показания каждого сенсора отдельно. Количество сенсоров в массиве, в основном, ограничивается спектральной шириной источника и динамическим диапазоном анализатора.

В статьях [19,20] представлены волоконно-оптические массивы сенсоров на брэгговских решетках с использованием WDM мультиплексирования. Ключевым устройством массива акустооптических сенсоров в работе [19] является многоволновый перестраиваемый волоконный лазер, в котором каждая длина волны является источником излучения для отдельного акустооптического сенсора, а перестройка длины волны излучения позволяет компенсировать вариации выходной мощности под воздействием температуры.

Рисунок 19 показывает концептуальную схему экспериментального массива волоконного WDM FBG массива акустооптических сенсоров использующего (semiconductor optical amplifier – полупроводниковый оптический усилитель) SOA-перестраиваемый лазер на трех длинах волн. Как показано на рисунке, лазерный модуль (пунктирная линия) содержит SOA как усилительную среду и три брэгговские решетки (FBGL1, FBGL2, FBGL3) как селективные элементы для трех длин волн. SOA – неоднородная усилительная среда, разрешает стабильные колебания на трех длинах волн и служит источником оптического излучения для массива ВБР с тремя чувствительными брэгговскими решетками (FBGS1, FBGS2, FBGS3). Три компоненты выходной мощности с разными длинами волн ($\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$) соответственно являются источниками для трех ВБР. Необходимо отметить парность брэгговских решеток (FBGS_i, FBGL_i, $i = 1, 2, 3$), причем ширина полосы FBGL_i значительно уже, чем у FBGS_i, и длина волны Брэгга у FBGL_i, λ_i , должна быть расположена в рабочей точке (месте наибольшего градиента) спектральной функции отражения FBGS_i. Кроме того, спектры отражения FBGS_i ($i=1, 2, 3$) значительно отделены друг от друга с целью реализации WDM мультиплексированного массива ВБР.

Как показано на рисунке 19, выходная мощность от источника излучения запускается в массив брэгговских решеток, так что три компоненты на разных длинах волн ($\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$) попадают на FBGS_i ($i=1, 2, 3$), при этом λ_i компонента отражается от соответствующей ей брэгговской

решетки FBGS_i и попадает на фотоприемник PD_i (i = 1, 2, 3) через оптический циркулятор. В результате, все амплитудно-модулированные акустическим воздействием на волоконные решетки компоненты с различными длинами волн могут быть приняты независимо.

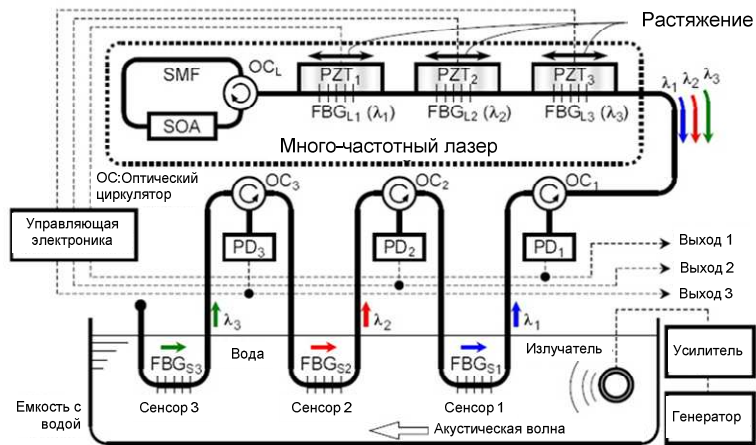


Рис. 19. Структурная схема экспериментального FBG массива

Настоящая схема нуждается в стабилизации рабочей точки, поскольку температура окружающей среды влияет на брэгговские решетки таким образом, что длина волны Брэгга решеток сдвигается – т.е. спектр излучения источника и спектр отражения решеток претерпевают относительный сдвиг. Перестройка длины волны источника позволяет скомпенсировать температурный дрейф рабочей точки. Для этого на брэгговские решетки лазера FBGL_i крепятся пьезокерамические элементы PZT, за счет которых прикладывается механическое напряжение к брэгговским решеткам. Как показано на рисунке 19, обратная связь применена для контроля воздействующих напряжений - рабочие точки определяются из сигнала постоянного тока фотодетектора и соответствующее механическое напряжение воздействует на решетки лазера FBGL_i, стабилизируя рабочие точки каждой ВБР.

На рисунке 20 представлены типичные спектры осцилляций лазерного источника и спектры отражения брэгговских решеток FBGS_i (i=1,2,3). Флуктуации выходной мощности на трех длинах волн для данного источника излучения составляли в эксперименте менее 0.1 дБ. Основные параметры решеток, использованных в лазере, представлены в таблице 1.

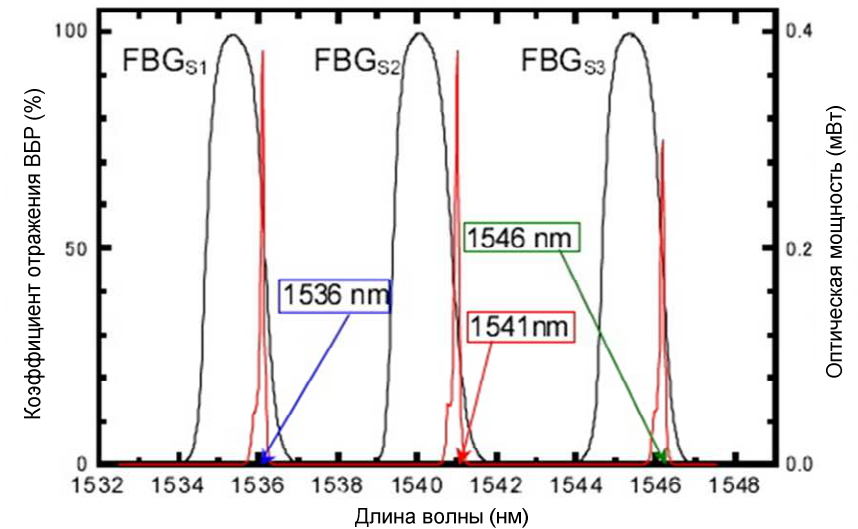


Рис. 20. Спектр излучения источника (узкие пики) и отражения брэгговских решеток FBGS_i (i=1,2,3)

Табл. 1. Параметры спектра отражения решеток, используемых в лазере, FBGL_i (i=1,2,3)

FBG (ВБР)	Центральная длина волны отражения, нм	Ширина спектра отражения по полувысоте, нм	Коэффициент отражения, %
FBGL ₁	1535.8	0.15	97
FBGL ₂	1540.7	0.14	98
FBGL ₃	1546.0	0.17	92

На рисунке 21 представлены полученные осциллограммы при воздействии на массив акустической волны на частоте 28 кГц. При этом заметна практически полная идентичность выходных сигналов от каждой волоконной решетки, что говорит об успешной реализации технологии WDM мультиплексирования и правильной работы всей акустооптической антенны в целом. Небольшие фазовые расхождения сигналов от брэгговских решеток обусловлены разницей в их расположении по отношению к источнику звукового излучения. В процессе эксперимента они находились от него на расстоянии 5, 25 и 50 см, соответственно.

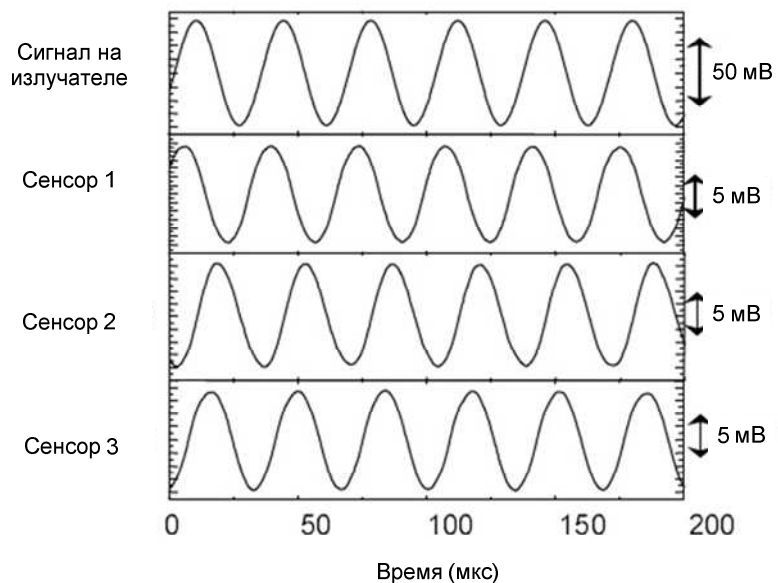


Рис. 21. Сигналы от брэгговских решеток при воздействии на массив акустической волны

Подробнее с принципом работы брэгговских решеток ознакомиться в работах [21,22], посвященных анализу принципа их действия, и в работе [23], посвященной новому способу их мультиплексирования. Существует также большое число работ по их различному применению: работа [24] рассматривает применение брэгговских решеток в качестве датчика для звукозаписи, работа [25] - в качестве датчика деформаций, а работы [26-32] посвящены применению брэгговских решеток в различных акустооптических сенсорах.

4.3. Волоконные акустооптические антенны на основе массива интерферометрических датчиков на брэгговских решетках

Принцип действия волоконно-оптической системы на основе фазовых интерферометрических датчиков (ФИД) в простейшем случае (в случае одного ФИД) показан на рисунке 22 и заключается в следующем. Каждая из решеток Брэгга РБ1 и РБ2 датчика отражает импульс, поступающий на нее от импульсного лазера, на одной и той же длине волны Брэгга. При этом временная задержка между отраженными импульсами равна удвоенному времени распространения света в чувствительном элементе датчика – волокне, заключенном между решетками.

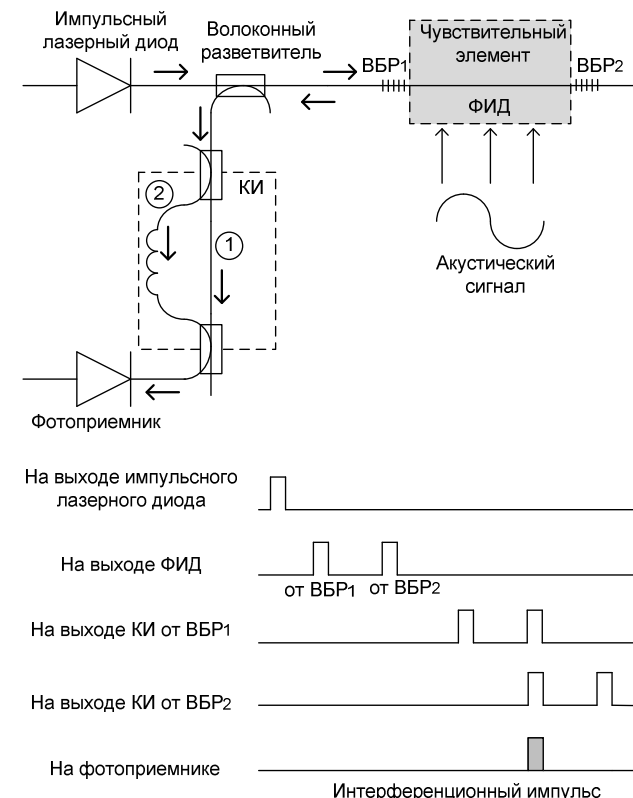


Рис. 22. Фазовый интерферометрический датчик с волоконными брэгговскими решетками

Отраженные импульсы поступают в компенсирующий интерферометр (КИ), который, в свою очередь, также раздваивает каждый из них. Задержка, вносимая в распространение импульсов плечом 2 КИ по отношению к плечу 1, обеспечивает перекрытие во времени импульса, отраженного от решетки РБ1, на выходе плеча 2 и импульса, отраженного от решетки РБ2, на выходе плеча 1 и сдвиг их по фазе на $\varphi_0 = \pi/2$. Изменение во времени деформации чувствительного элемента датчика в результате внешнего воздействия вызывают изменение разности фаз интерферирующих импульсов. Последнее преобразуется фотоприемником (ФП) в изменение величины тока. Дополнительный сдвиг фаз $\varphi_0 = \pi/2$ между интерферирующими импульсами обеспечивает работу фотодетектора на участке максимальной крутизны, а равенство интенсивностей интерферирующих импульсов позволяет получить максимальную амплитуду сигнала на выходе фотоприемника.

Использование волоконных брэгговских решеток для формирования ФИД, позволяет объединять в одном кабеле большое количество сенсоров,

различия сигналы от отдельных волоконно-оптических акустооптических сенсоров по длине волны и временной задержке.[33,34] Метод мультиплексирования сигналов отдельных ФИД показан на рисунке 23.

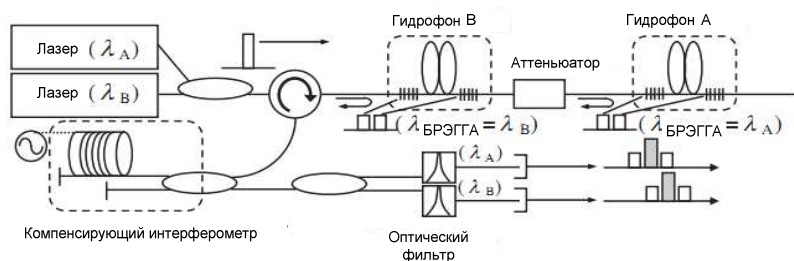


Рис. 23 Схема мультиплексирования сигнала отдельных фазовых интерферометрических датчиков на брэгговских решетках

Глава 5. Применение волоконных акустооптических антенн

5.1. Рынок волоконных акустооптических антенн

Рынок производителей волоконных акустооптических антенн насчитывает около 10 компаний и только начинает развиваться. Наиболее крупной из них является компания Paulsson Inc. (США).

В своей системе компания Paulsson Inc. применяет интерферометрический метод регистрации оптического сигнала с помощью массива фазовых интерферометрических датчиков на брэгговских решетках. Принципиальная схема размещения оборудования волоконной акустооптической антенны представлена на рисунке 24. Основным преимуществом указанного метода является возможность регистрировать одновременно несколько событий на всей длине акустооптического кабеля.

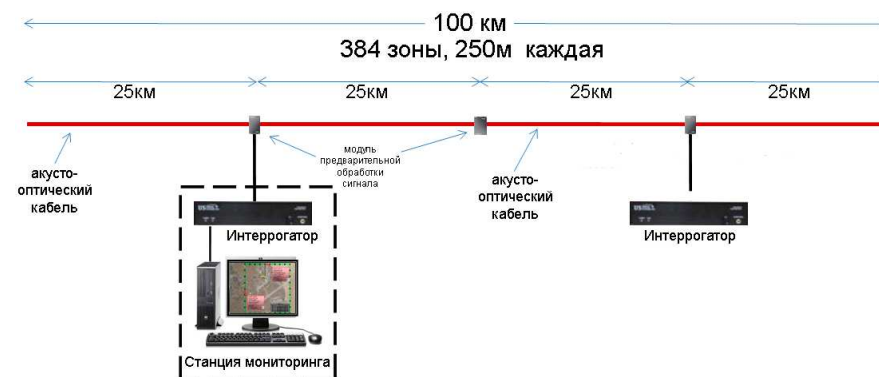


Рис. 24. Принципиальная схема размещения оборудования волоконной акустооптической антенна компании Paulsson Inc.

Использование указанного метода позволяет использовать менее производительные, более дешевые и компактные модули предварительной обработки оптического сигнала и монтировать их непосредственно на кабель, что существенно снижает требования к вычислительным мощностям, необходимым для обработки выходного сигнала. Размеры модуля обработки сигнала сопоставимы с внешним диаметром кабеля и позволяют производить акустооптический кабель с постоянным по длине диаметром.

5.2. Волоконно-оптические гидроакустические антенны

Хорошо изучены и широко распространены гидроакустические датчики на пьезокерамических элементах, основными недостатками которых являются сложность их мультиплексирования и сравнительно большие весогабаритные параметры. По этой причине все чаще применяются при

проведении гидроакустических исследований волоконные акустооптические антенны.

Волоконные фазовые интерферометрические датчики находят применение при создании: донных сейсмических модулей, буксируемых протяженные гидроакустических антенн и стационарных протяженных донных сейсмических кос (рис. 25).

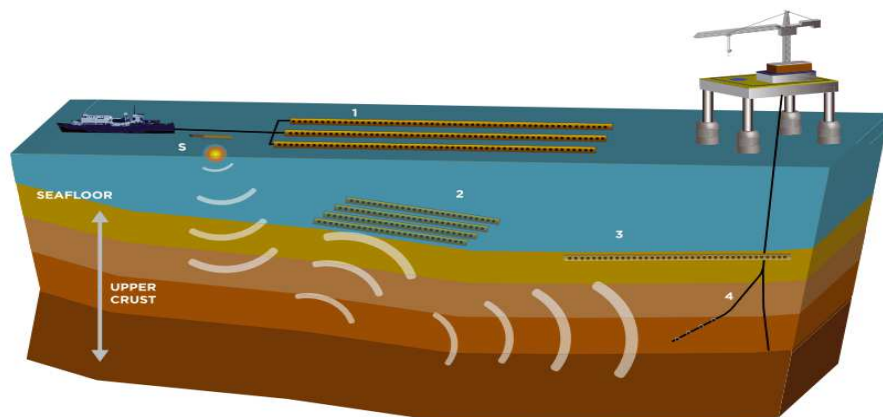


Рис. 25. Различные способы применения волоконных акустооптических антенн для сейсморазведки

Уже сегодня волоконный акустооптический кабель, производства фирмы Paulsson Inc находит применение для обеспечения безопасности объектов инфраструктуры морского и речного транспорта.

Норвежская фирма Optowave предлагает донные сейсмические косы на основе волоконных акустооптических антенн. Эта фирма также применяет в своих системах конструкцию на основе массива фазовых интерферометрических датчиков на брэгговских решетках. Внешний вид чувствительного элемента донной сейсмической косы и донного модуля представлен на рисунке 26.

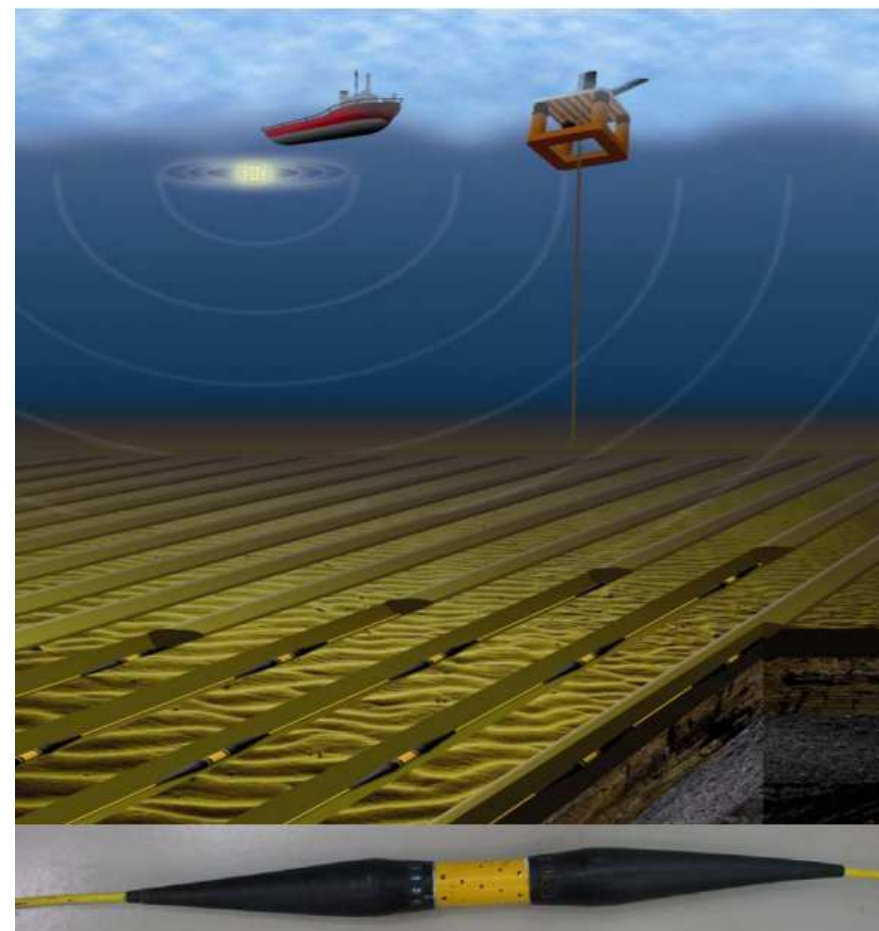


Рис. 26. Внешний вид чувствительного элемента донной сейсмической косы и донного модуля компании Optowave

С 2007 г. по заказу ВМС США ведутся разработки волоконно-оптической буксируемой антенны, получившей обозначение ТВ-33. В качестве разработчиков выступают: Управление подводной войны (NUWC) и Научной исследовательской лаборатории ВМС США, а также частные компании: L-3 Chesapeake Sciences Corporation (Millersville, шт. Мэриленд) и General Dynamics Advanced Information Systems (Fairfax, шт. Виргинии).

По имеющейся в открытой печати информации в волоконной акустооптической антенне ТВ-33 используется массив слабоотражающих волоконных брэгговских решеток. При этом в акустооптической антенне осуществляется мультиплексирование волоконных сенсоров, как по времени, так и по длине волны. Благодаря выбранной архитектуре в волоконной

акустооптической антенне минимизировано количество оптических каналов, за счет этого удалось минимизировать диаметр буксируемого кабеля.

В настоящее время программа разработки волоконно-оптической буксируемой антенны ТВ-33 находится на финальном этапе. В настоящее время в нашей стране также проводятся работы по разработке волоконно-оптических буксируемых и покровных гидроакустических антенн, которые смогут полностью заменить пассивные гидроакустические антенны на основе пьезокерамических элементов.

5.3. Применение волоконных акустооптических антенн для трубопроводного транспорта

Волоконный акустооптический кабель все шире применяется для мониторинга состояния и охраны от несанкционированного доступа к магистральным трубопроводным линиям.

Волоконный акустооптический кабель крепится к поверхности трубопровода. С помощью измерения параметров оптического сигнала, направляемого с модуля обработки сигналов, определяются физические характеристики участка трубопровода, такие как механическое напряжение поверхности трубопровода, температуру участка трубопровода и т.д. Общая длина участка кабеля, с которого может регистрироваться оптический сигнал одним модулем обработки сигналов, составляет 25-30 км. Пример установки акустооптического кабеля на магистральные трубопроводы представлен на рисунке 27.

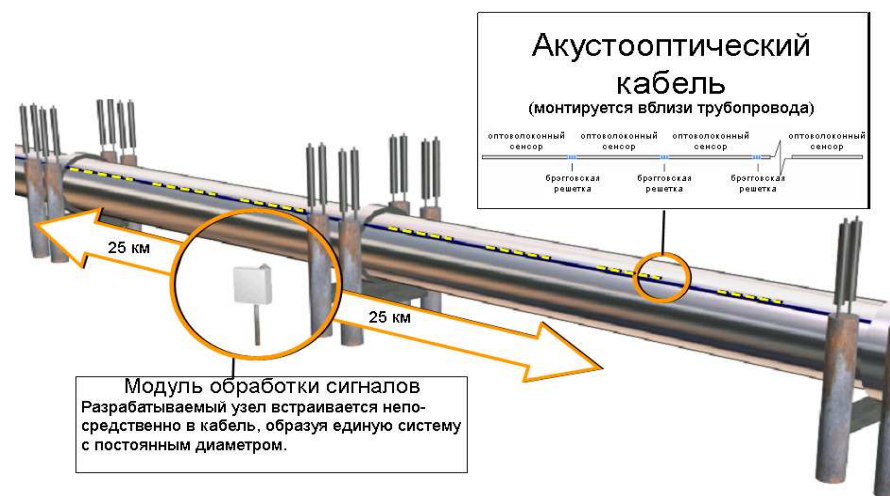


Рис. 27. Применение акустооптического кабеля для мониторинга состояния трубопровода

Системы мониторинга и охраны трубопроводов на базе волоконных акустооптических антенн способны выполнять следующие функции:

- обеспечивать безопасность функционирования трубопроводов. Использование акустооптического кабеля позволяет в реальном времени выявлять места нарушения целостности конструкции трубопровода;

- обеспечивать постоянный удаленный мониторинг состояния трубопроводов. Благодаря анализу измеряемых параметров возможно своевременно определять места, где начинается коррозия трубопровода и своевременно провести соответствующие профилактические работы.

Вид изображения с дисплея пульта оператора для системы волоконно-оптической системы мониторинга состояния трубопровода Paulssen Inc. с указанием места воздействия на трубопровод представлен на рисунке 28.

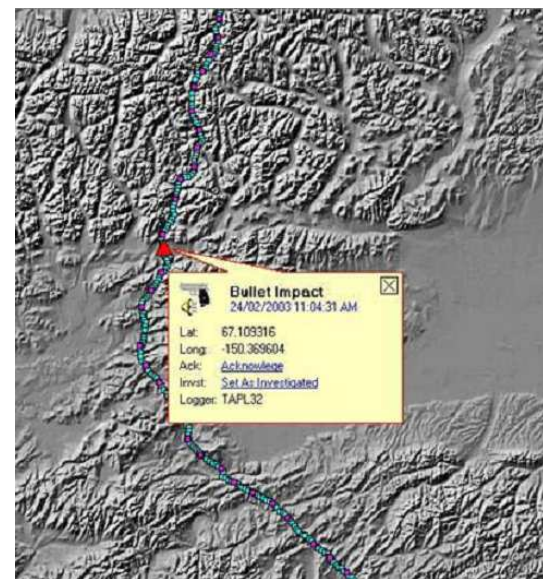


Рис. 28. Типичный вид изображения с дисплея пульта оператора для системы волоконно-оптической системы мониторинга состояния трубопровода с указанием места несанкционированного доступа

5.4. Волоконные акустооптические антенны для мониторинга состояния и охраны железнодорожных путей

Волоконная акустооптическая антенна может быть установлена на железнодорожное полотно и использована для определения деформации и смещения железнодорожных путей, а также для определения расположения и параметров массы и скорости, движущегося по ним, железнодорожного транспорта.

Помимо вышеуказанного применения акустооптический кабель может быть установлен вдоль железнодорожных путей или по периметру объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта для их охраны от проведения несанкционированных работ.

Таким образом, системы на основе волоконных акустооптических антенн могут быть использованы для решения следующих задач области железнодорожного транспорта:

- мониторинг состояния железнодорожного полотна;
- мониторинг движения поездов;
- обеспечение безопасности железнодорожных путей и объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта;
- мониторинг состояния тоннелей, развязок, мостов и других объектов железнодорожных путей.

5.5. Иные применения волоконных акустооптических антенн

Помимо вышеописанных областей применений волоконные акустооптические антенны могут быть использованы для обеспечения безопасности территорий промышленных объектов, частных территорий, объектов специального назначения и т.д. Пример размещения акустооптического кабеля на сетке «рабице» в качестве системы безопасности периметра представлен на рисунке 29.



Рис. 29. Акустооптический кабель для систем безопасности объектов.

Основными методами, используемыми в современных волоконно-оптических системах мониторинга безопасности периметров являются:

- Метод регистрации межмодовой интерференции;
- Метод регистрации спекл-структуры;
- Рэлеевское обратное рассеяние;
- Манделъштам-Бриллюэновское обратное рассеяние.

Все указанные методы обладают достоинствами, присущими волоконно-оптическим датчикам.

При этом существенным недостатком методов регистрации межмодовой интерференции и регистрации спекл-структуры является невозможность мультиплексировать большое количество сенсорных участков на одном отрезке акустооптического кабеля, что не позволяет создавать сенсорные системы большой длины.

Системы, использующие принцип Рэлеевского обратного рассеяния или принцип Манделъштам-Бриллюэновского рассеяния, имеют чувствительность на два порядка ниже, чем системы, где используется интерферометрический метод. Поэтому акустооптические кабельные преобразователи на основе оптического волокна с массивами брэгговских решеток имеют ряд конкурентных преимуществ, по сравнению с традиционными волоконно-оптическими системами безопасности территорий объектов:

- Надежность. В конструкции кабеля отсутствуют механические детали. Кабель не подвержен коррозии.

- Малый вес. Акустооптический кабель изготавливается из полимерных материалов. Вес акустооптического кабеля в 10-15 раз меньше веса медного кабеля той же длины и сечения.

- Малое энергопотребление. Электрическая энергия требуется только для поддержания работы интеррогаторов (блоков выработки и обработки оптических сигналов).

- Автономность. Блоки подачи и обработки сигналов устанавливаются каждые 40-50 км. В пределах указанного участка не требуется присутствие оператора. Возможно объединение интеррогаторов в единую сеть для передачи информации.

- Помехоустойчивость. Разрабатываемая система использует оптические сигналы для передачи информации и не подвержена влиянию помех, вызванных электромагнитными полями.

Список использованной литературы

1. **Shizhuo Yin.** Fiber Optic Sensors / Shizhuo Yin, Paul B. Ruffin, Francis T. S. Yu. // 2nd ed. CRC Press, Taylor & Francis Group. – 2008.
2. **Hodgson, W.** Optimization of Large-Scale Fiber Sensor Arrays Incorporating Multiple Optical Amplifiers—Part I: Signal-to-Noise Ratio Craig / W. Hodgson, Jefferson L. Wagener, Michel J. F. Digonnet, Herbert J. Shaw // Journal of Lightwave Technology. –1998.–vol. 16, №2.
3. **Digonnet, M. J. F.** Acoustic Fiber Sensor Arrays / M. J. F. Digonnet, B. J. Vakoca, C. W. Hodgson, G. S. Kino Edward L // Second European Workshop on Optical Fibre Sensors. Proceedings of SPIE. – 2004. – Vol. 5502, P. 39-50.
4. **Kersey, A. D.** 64-element timedivision multiplexed interferometric sensor array with EDFA telemetry / A. D. Kersey, A. Dandridge, A. R. Davis, C. K. Kirdendall, M. J. Marrone, D. G. Gross // Conference on Optic Fiber Communication, OFC'96, Technical Digest Series. –1996.– Vol. 2, Paper ThP5, P.270-271.
5. **Cranch, A. G.** Large-scale remotely interrogated arrays of fiber-optic interferometric sensors for underwater acoustic applications / A. G. Cranch, P. J. Nash, C. K. Kirkendall // IEEE Sensors Journal. – 2003. – Vol. 3, No. 1, P. 19-30.
6. **Hodgson, C. W.** Large-scale interferometric fiber sensor arrays with multiple optical amplifiers / C. W. Hodgson, M. J. F. Digonnet, H. J. Shaw // Optics Letters. –1997. – vol. 22, No. 21, P. 1651-1653.
7. **Houston, M. H.** Seismic fiber optic multiplexed sensors for exploration and reservoir management / M. H. Houston // Proceedings of SPIE. – 2000. – Vol. 4202, –P. 31-38.
8. **Houston, M. H.** Fiber optic sensor systems for reservoir fluids management / M. H. Houston, B. N. P. Paulsson, L. C. Knauer // OTC1193I, Offshore Technology Conference, Houston. – 2000. – TX.
9. **Zhou Meng.** Development of a 32-element fibre optic hydrophone system. / Zhou Meng, Yongming Hu, Ming Ni, Shuidong Xiong, Renhe Zhang, Xiuling Li, George Stewart, Fengzhong Dong and Brian Culshaw // Proceedings of SPIE. – 2004. – Vol. 5589, P. 114-119.
10. **Ted Bick.** CENTURION – A Total Port Maritime Surveillance Concept // <http://www.es.northropgrumman.com/solutions/centurion/assets/centurionwhitpaper.pdf>
11. **Benjamin J. Vakoc.** A Novel Fiber-Optic Sensor Array Based on the Sagnac Interferometer / Benjamin J. Vakoc, Michel J. F. Digonnet, Gordon S. Kino // Journal of Lightwave Technology. –1999.– vol. 17, № 11.
12. **Digonnet, M. J. F.** Acoustic Fiber Sensor Arrays / M. J. F. Digonnet, B. J. Vakoca, C. W. Hodgson, G. S. Kino Edward L. // Second European Workshop on Optical Fibre Sensors. Proceedings of SPIE . –2009.– Vol. 5502.
13. **Song Zhangqi.** Research on a novel fiber-optic acoustic/rotation sensor array based on the Sagnac interferometer. / Song Zhangqi, Yang Mingye, Zhang Xueliang, Cao Chunyan, Xiong Shuidong // 20th International Conference on Optical Fibre Sensors. Edited by Jones, Julian D. C. // Proceedings of the SPIE. –2009.– Volume 7503.
14. **Changsen Sun.** Multiplexing of fiber-optic acoustic sensors in a Michelson interferometer configuration / Changsen Sun // Optics Letters. –2003.– vol. 28, №. 12.
15. **Stéphane Blin.** Pickup Suppression in Sagnac-Based Fiber-Optic Acoustic Sensor Array / Stéphane Blin, Michael Bishop, Krishnan Parameswaran, Michel J. F. Digonnet, Gordon S. // Kino Proceedings of SPIE. –2005.– vol. 6004.
16. **Benjamin J. Vakoc.** Demonstration of a folded Sagnac sensor array immune to polarization-induced signal fading / Benjamin J. Vakoc, Michel J. F. Digonnet, Gordon S. Kino // Applied Optics. –2003.– vol. 42, №. 36.
17. **Гармаш, В.Б.** Возможности, задачи и перспективы волоконно-оптических измерительных систем в современно приборостроении. / В.Б. Гармаш, Ф.А. Егоров, Л.Н. Коломиец, А.П. Неугодинов, В.И. Поспелов // Спецвыпуск «Фотон-экспресс» – Наука. –2005.– №6.
18. **Chiaki Okawara.** Fiber optic interferometric hydrophone using fiber Bragg grating with time division multiplexing / Chiaki Okawara, Kenji Saijyou // Acoustical Science and Technology. –2007.– 28, 1.
19. **Tanaka, S.** Fiber Bragg grating hydrophone array using multi-wavelength laser: simultaneous multipoint underwater acoustic detection / S. Tanaka, A. Wada, N. Takahashi // Proceedings of SPIE. –2009.– vol. 7503.
20. **Chiaki Okawara.** Fiber optic interferometric hydrophone using fiber Bragg grating with wavelength division multiplexing / Chiaki Okawara, Kenji Saijyou // Acoustical Science and Technology. –2008.– 29, 3.
21. **Mousumi Majumder.** Fibre Bragg gratings in structural health monitoring - Present status and applications / Mousumi Majumder, Tarun Kumar Gangopadhyay, Ashim Kumar Chakraborty, Kamal Dasgupta, D.K. Bhattacharya // Sensors and Actuators. –2008.– vol. 147.
22. **Das Indu Shekhar.** Analysis of fiber Bragg grating sensors in smart structures / Das Indu Shekhar, Srinivas Talabattula, Selvarajan A. // Proceedings of SPIE. –1997. – vol. 3241.
23. **Ian C.M. Littler.** Gray Multiplexed fiber optic acoustic sensors in a 120 km loop using RF modulation / Ian C.M. Littler, Jong H. Chow, Daniel A. Shaddock, David E. McClelland, Malcolm B. // Fiber Optic Sensors and Applications V, Proceedings of SPIE. –2007.– vol. 6770.
24. **Nicholas Ballard.** Musical instrument recordings made with a fiber Fabry-Pérot cavity: photonic guitar pickup / Nicholas Ballard, Daniel Paz-Soldan, Peter Kung, Hans-Peter Loock // Applied Optics. – 2010. – Apr 10; 49(11), P. 2198-203.

25. **Suzhen Lil.** Sensitivity Enhancement of Long-gage FBG/ Suzhen Lil, Zhishen Wu // *Sensors for Macro-strain Measurements Structural Health Monitoring* . – 2009. – vol. 8, P. 6415-423.
26. **Nobuaki Tal~Ahashi.** Underwater Acoustic Sensor with Fiber Bragg Grating / Nobuaki Tal~Ahashi, Akihiro Hirose, Sumio Takahashi // *Optical Review*. – 1997. – vol. 4, № 6, P. 691-694.
27. **Stefania Campopiano.** Underwater Acoustic Sensors Based on Fiber Bragg Gratings / Stefania Campopiano, Antonello Cutolo, Andrea Cusano, Michele Giordano, Giuseppe Parente, Giuseppe Lanza, Armando Laudati // *Sensors*.– 2009.– № 9, P.4446-4454.
28. **Cusano, A.** Optical Fiber Hydrophone Using Polymer-Coated Fiber Bragg Grating / A. Cusano, S. Campopiano, S. D'Addio, M. Balbi, S. Balzarini, M. Giordano, and A. Cutolo // *Optical Fiber Sensors, OSA Technical Digest (Optical Society of America. –2006.–paper ThE85*.
29. **Wentao Zhang.** Fiber Bragg grating hydrophone with high sensitivity Chinese / Wentao Zhang, Yuliang Liu, Fang Li // *Optics Letters*. –2008.– vol. 6, No. 9.
30. **Bai-Ou Guan.** Dual polarization fiber grating laser hydrophone / Bai-Ou Guan, Yan-Nan Tan, Hwa-Yaw Tam // *Optics Express*. –2009.– vol. 17, № 22.
31. **Michie, A.** Noise Improvement of a Bragg Grating Fibre Laser Hydrophone System with Referencing Configuration / A. Michie, D. Jones, D. H. Wang, D. Mann, M. L. Åslund, S. Fleming and J. Canning // *Bragg Gratings, Photosensitivity, and Poling in Glass Waveguides, OSA Technical Digest, Optical Society of America. –2007.– paper JThA44*.
32. **Asrul Izam Azmi.** Fiber Laser Based Hydrophone Systems / Asrul Izam Azmi, Ian Leung, Xiaobao Chen, Shaoling Zhou, Qing Zhu, Kan Gao, Paul Childs, Gangding Peng // *Photonic Sensors Coverage*. – 2011. – vol. 1.
33. **Okawara, C.** Fiber optic interferometric hydrophone using fiber Bragg grating with time division multiplexing / C. Okawara, Kenji Saijyou // *Acoust. Sci. & Tech.* –2007.–28, 39–42.
34. **Chiaki Okawara.** Fiber optic interferometric hydrophone using fiber Bragg grating with wavelength division multiplexing / Chiaki Okawara, Kenji Saijyou // *Acoust. Sci. & Tech.* –2008.– 29, 3.

Список сокращений

ВБР	волоконная брэгговская решетка
PGC	phase-generated carrier
TDM	time division multiplexing
WDM	Wavelength Division Multiplexing
NRL	Naval Research Laboratory
EDFA	усилителей с большими коэффициентами усиления
RPEDFA	датчиков с использованием эрбиевого усилителя с удаленной накачкой
CW пучок	пучок, движущийся по часовой стрелке
CCW пучок	пучок, движущийся против часовой стрелки
КИ	компенсирующий интерферометр
ФП	фотоприемник

Миссия университета – генерация передовых знаний, внедрение инновационных разработок и подготовка элитных кадров, способных действовать в условиях быстро меняющегося мира и обеспечивать опережающее развитие науки, технологий и других областей для содействия решению актуальных задач.

КАФЕДРА СВЕТОВОДНОЙ ФОТОНИКИ

Кафедра световодной фотоники (раннее кафедра физики и техники оптической связи) вошла в состав инженерно-физического факультета в 1976 году и в 2010 году была переведена на вновь созданный факультет инфокоммуникационных технологий. Заведующим кафедрой является д.т.н., профессор, заслуженный деятель науки РФ И.К. Мешковский. На кафедре развились два научно-технических направления: технология оптического волокна и создание новых композиционных оптических материалов. В 1982 году кафедра первой в стране стала осуществлять подготовку инженеров по специальности «Волоконная и интегральная оптика». На базе кафедры были проведены первые в России разработки по технологии производства оптического волокна, оптических жгутов, различных волоконно-оптических приборов и систем. Возникла научная школа в области фотоники дисперсных и нелинейных сред. В 1998 году в связи с развитием систем телекоммуникации и высокими потребностями в специалистах по волоконно-оптической связи кафедра первой в Санкт-Петербурге стала осуществлять подготовку инженеров по специальности «Физика и техника оптической связи». С 2008 года – подготовку бакалавров и магистров по направлению «Телекоммуникации», а с 2011 года – подготовку бакалавров и магистров по направлению «Инфокоммуникационные технологии и системы связи». Кафедра осуществляет научные разработки совместно со многими зарубежными и отечественными промышленными компаниями, ведущими научными центрами и университетами.

Куликов Андрей Владимирович

Волоконные акустооптические антенны и их применение

Учебное пособие

В авторской редакции
Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО
Зав. РИО Н.Ф. Гусарова
Подписано к печати
Заказ №
Тираж
Отпечатано на ризографе