

Рахимов Т.Г., Рахимов Б.Н., Бердиев А.А., Мирсагдиев О.А.

## Информационно-измерительная техника на основе волоконно-оптических датчиков и систем

**Аннотация.** Мониторинг состояний исследуемого или наблюдаемого объекта стал ключевой технологией во многих областях, от развлекательных технологий до здравоохранения, транспорта и многих промышленных технологий, а также во многих таких передовых приложениях, где миниатюризация, чувствительность и дистанционные измерения имеют жизненно важное значение. Методы мониторинга на основе оптического волокна могут обеспечить новые решения, что в свою очередь, актуализирует проведение дополнительных исследований.

Данная статья посвящается обширному обзору типов волоконно-оптических датчиков, применяемых в различных сферах структурного мониторинга инженерных сооружений. Рассматриваются волоконные световоды в разных условиях применения, перечислены преимущества волоконно-оптических датчиков перед обычными электронными датчиками. Изучены точечные, распределенные и квазираспределенные виды волоконных датчиков. Кроме этого, рассмотрена классификация волоконно-оптических датчиков по типу чувствительных оптических параметров и по типу взаимодействия с измеряемой средой. А также приведена информация о типах волоконно-оптических датчиков в зависимости от изменяемого свойства света.

**Ключевые слова:** зондирование, волоконно-оптические датчики, брэгговские решетки, чистоволоконные оптические датчики, сила фототока, волоконные световоды.

### Введение

С развитием современных технологий все чаще возникает задача организации мониторинга различных сред и конструкций с учетом большого числа физических величин: электрических, механических, химических, векторных смещений и т.д. Эти величины характеризуют состояние управляемых или исследуемых физических объектов и процессов. Поэтому в настоящее время все чаще возникает необходимость создания измерительных систем, способных осуществлять высокоэффективный сбор, передачу и обработку данных о состоянии сложных физических объектов. Например, в задачах геофизики, океанографии и при слежении за состоянием земного грунта, предупреждение и оповещение в случаях оползней, обвалов в горнодобывающих шахтах и т.п., сбор информации осуществляется на больших площадях, поэтому длина информационных каналов может достигать тысяч метров. При этом особое внимание уделяется мониторингу протяженных объектов: шахт, мостов, туннелей, дамб, плотин, взлетно-посадочных полос, нефтепроводов и прочих сооружений. Применение традиционных электронных измерительных средств приводит к появлению аддитивного шума вследствие применения длинных линий для передачи слабых электрических сигналов, а это снижает помехозащищенность данной системы. Ограничение применения информационно-измерительных систем на основе подобных устройств объясняется их низким быстродействием, значительными размерами и массой оборудования, жесткостью условий для измерительных устройств, низкой помехозащищенностью от внешних воздействий и т.д. Кроме того, увеличение длины информационных каналов приводит к увеличению массы и стоимости всей измерительной системы.

В сложившихся условиях технология оптического зондирования развивается как мощная и богатая технология, которая в настоящее время применяется в самых разных приложениях. Несколько новых типов волоконно-оптических датчиков пока постепенно появляются, а некоторые из волоконно-чувствительных технологий уже находятся в зрелом состоянии и коммерчески производятся и используются в различных приложениях. Поскольку технология световых волн становится новой технологией, направленной на поддержание многих передовых высокопроизводительных приложений, оптоволоконные датчики могут играть неотъемлемую роль и в этих разработках.

Ключевым решением проблемы в данной области является применение различных оптико-электронных сенсорных систем.

Они позволяют экономично создать интегрированные телеметрические линии и сети повышенной надежности и безопасности для систем мониторинга различных сложных структур. Такие системы имеют ряд преимуществ по сравнению с их аналогами: электромагнитные излучения не влияют на результат измерения; отсутствуют проблемы с контурами заземления и явлениями дугообразования и искрения; обеспечиваются высокая стойкость к вредным воздействиям среды, простота мультиплексирования сигналов, высокая скорость передачи данных.

### Сравнительный анализ современных волоконно-оптических датчиков

Волоконные световоды условно разделяются на две категории: *специальные* и *телекоммуникационные*. В соответствии с названием телекоммуникационные световоды применяются в различных системах связи. Специальные оптические волокна нашли другое применение. В настоящее время активно развивается направление создания устройств и приборов на основе спецволокна. Оптические волокна применяются в датчиках различных физических параметров (температуры, давления, механических воздействий и т.д.), в системах мониторинга протяженных объектов, навигационных устройствах, медицинских приборах и пр.

Сочетание в едином потоке волоконного световода функций передающей световое излучение среды и чувствительного элемента оптоэлектронного датчика представляет перспективные возможности для создания уникальных, не имеющих аналогов в измерительной технике, быстро реагирующих измерительных устройств, которые способны интегрироваться в протяженные измерительные системы. Их важным достоинством являются малая масса, эластичность, возможность встраиваться в композитные материалы без нарушения или изменения их свойств, противостоять коррозии и, кроме всего, иметь потенциально низкую стоимость. Допустима эксплуатация таких систем в суровых и экстремальных условиях, взрывоопасных, горючих и химически агрессивных средах, при чрезмерно высоких давлениях и температурах, а также при электромагнитных помехах и ионизирующих излучениях. Они являются абсолютно безопасными в газовых и взрывчатых средах. Кроме

того, их принципиально преимущественной стороной является скорость передачи информационного потока по сравнению другими типами передачи информации.

Применение информационно-измерительной техники на основе волоконно-оптических датчиков обеспечивает возможность создания систем мониторинга и радиомониторинга, которые своевременно оповещают и предупреждают о процессах перегрева, возгорания, деградации, износа или разрушения на объектах, сообщают о состоянии земного грунта на определенных секторах, которые имеют потенциальную опасность проявления оползневых процессов и обвалов (шахты, территории горной промышленности в процессе разведки и добычи полезных ископаемых). Разработанные системы радиомониторинга на опасных объектах предотвращают развитие чрезвычайных ситуаций – аварий, катастроф и гибель людей, а также уменьшают ущерб к техническим ресурсам производства.

Основными составляющими таких информационно-измерительных систем являются волоконно-оптические датчики. Волоконно-оптический датчик (ВОД) – это средство измерения, состоящее из измерительных преобразователей (ИП), преобразующих измеряемую физическую величину в какой-либо параметр оптического сигнала, передаваемого по оптическому волокну, соединенного волоконно-оптической линией связи с устройством преобразования и обработки оптических сигналов, обеспечивающим метрологические свойства датчика и выработку сигналов измерительной информации в удобном виде [1]. Волоконно-оптические датчики также можно описать как оптоволоконные устройства для детектирования некоторых величин, (температура или механическое напряжение), а также смещения, вибрация, давления, ускорения, вращения, и даже концентрации химических веществ. Общий принцип таких устройств заключен в том, что свет от лазера (чаще всего однододового волоконного лазера) или суперлюминесцентного оптического источника передается через оптическое волокно, при этом учитывается слабое изменение своих параметров в волокне или в одной или нескольких брэгговских решетках, а затем достигает схемы детектирования, которая оценивает эти изменения. ВОД является многофункциональным техническим приложением оптоэлектроники, волоконной и интегральной оптики. Основой этого является многопараметровость исходного оптического сигнала – то есть одновременное наличие в нем информации об изменяющихся амплитудах, длинах волны и поляризации во времени и в пространстве [2].

Что касается преимуществ волоконно-оптических датчиков, они являются отличными кандидатами для мониторинга внешних изменений. Некоторые из преимуществ волоконно-оптических датчиков перед обычными электронными датчиками заключены в следующем:

- устойчивость к агрессивным и горючим средам
- абсолютная взрыво-пожаробезопасность
- помехозащищенность от электромагнитных и радиационных помех
- широкополосность (многоканальное измерение по одному волокну)
- многопараметровая чувствительность (один датчик на несколько параметров)
- высокое быстродействие
- распределенные измерения (система датчиков в одном протяженном волокне)
- длительное и непрерывное измерения
- низкая масса
- низкая мощность
- экологическая прочность

- возможность мультиплексирования
- многофункциональная возможность измерения
- простая интеграция в самых разнообразных конструкциях

Существующие ВОД можно условно разделить на три типа: *точечные*, *распределенные* и *квазираспределенные*. *Точечные* позволяют контролировать с высокой точностью такие параметры объекта как температура, давление, скорость вращения и т.д. *Распределенные* ВОД непрерывно контролируют параметры больших протяженных объектов с заданной разрешающей пространственной способностью. *Квазираспределенные* ВОД объединяют преимущества первых двух типов датчиков и являются более универсальными. Они состоят из массивных точечных сенсорных элементов, объединенных общим оптическим волокном. Каждый элемент обладает уникальными характеристиками, что позволяет провести их независимый анализ [1].

Из точечных ВОД возможно создать квазираспределенный волоконно-оптический датчик. В оптическое волокно встраивается несколько дискретных точечных чувствительных элементов (ЧЭ), в которых под действием внешних воздействий происходит модуляция интенсивности, фазы или спектра излучения. На рис. 1 представлены две основные схемы построения точечных ВОД, которые могут использоваться, как например, для измерения температуры или давления: отражательного (рис. 1а) и проходного типа (рис. 1б).

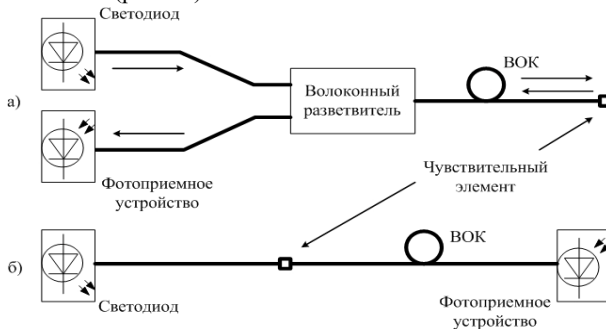


Рис.1. Схема ВОД отражательного (а) и проходного (б) типа с чувствительными элементами

#### Классификация волоконно-оптических датчиков

Волоконно-оптические датчики обобщенно классифицируются по типу чувствительных оптических параметров на следующие виды (рис. 2): *амплитудные* (по интенсивности оптического сигнала), *фазовые* (интерференционные), *частотные* (дифракционные), *туннельные* (фазово-амплитудные), *комбинированные* (фазово-частотные) и *поляризационные*.

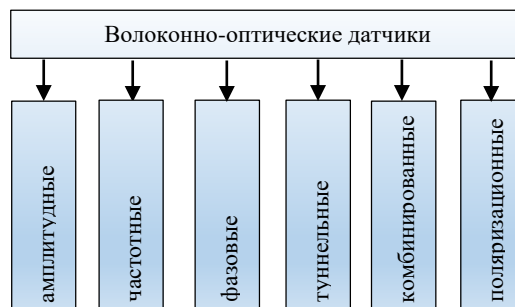


Рис. 2. Классификация волоконно-оптических датчиков по типу чувствительных оптических параметров

Тоннельные волоконно-оптические датчики основаны на эффекте туннельного перетекания энергии одномодового оптического сигнала между выходами оптического разветвителя при внешнем воздействии на двулучепреломляющий компаунд чувствительной зоны.

Комбинированные волоконно-оптические датчики работают по принципу одновременного применения двух или более видов чувствительных оптических параметров (амплитуда и частота) [3].

Кроме этих типов, существуют ВОД по типу применяемых оптических волокон – одномодовые и многомодовые, а по типу взаимодействия с измеряемой средой ВОД обычно подразделяют на *проходящие, отражательные и антенные*.

Структурные схемы таких датчиков по типу взаимодействия с измеряемой средой приведены на рисунках 3-5.

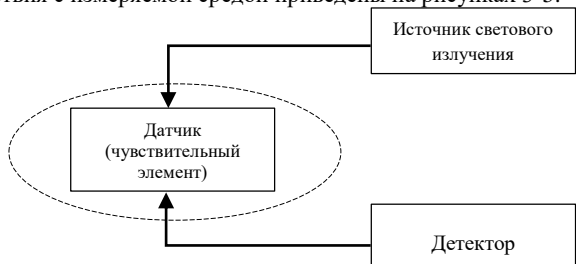


Рис. 3. Волоконно-оптический датчик проходящего типа

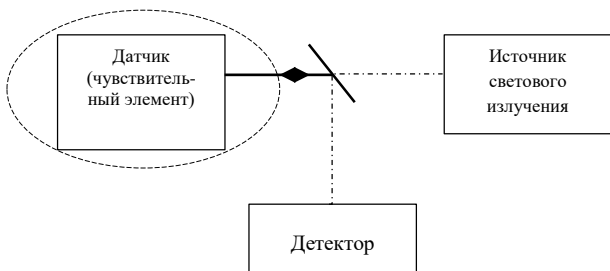


Рис. 4. Волоконно-оптический датчик отражательного типа

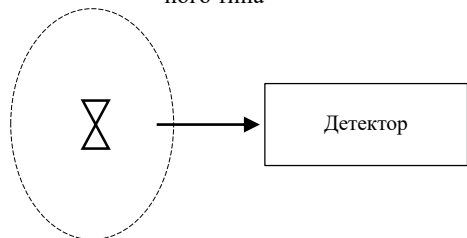


Рис. 5. Волоконно-оптический датчик антенного типа [4]

Волоконно-оптический датчик преобразует физический параметр в оптический выход. Ключевой частью каждого волоконно-оптического датчика является преобразователь - устройство, которое преобразует одну форму энергии, связанную с физическим параметром, в другую форму энергии (рис. 3). В зависимости от типа преобразователя все оптоволоконные датчики делятся на две большие категории: *внешние* и *внутренние* датчики.

В типах внешних датчиков оптическое волокно используется в качестве средства для переноса света во внешнюю чувствительную систему, в то время как в собственном типе свет не должен покидать оптическое волокно для выполнения функции обнаружения. В случае внешнего датчика оптическое волокно служит механизмом доставки для направления оптического сигнала в чувствительную

область вне волокна, где он модулируется в ответ на интересующий физический параметр и затем собирается тем же (или другим) оптическим волокном и направляется на детектор для обработки. В собственном датчике оптическое волокно действует как средство для транспортировки оптического сигнала из чувствительной области и как преобразователь. Внутренние типы волоконных датчиков более привлекательны и широко исследованы, поскольку их схема имеет много преимуществ по сравнению с внешними, например такими, как их внутренняя природа и гибкость в конструкции головки волоконного датчика [4].

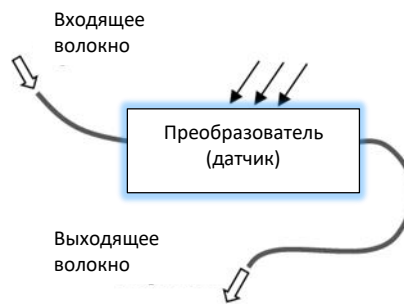


Рис. 6. Тип волоконно-оптического датчика: внешний (зондирование выполняется вне волокна)

На рис. 7. приведены основная часть «чистоволоконных» датчиков, в которых оптическое волокно используется в качестве чувствительного элемента.

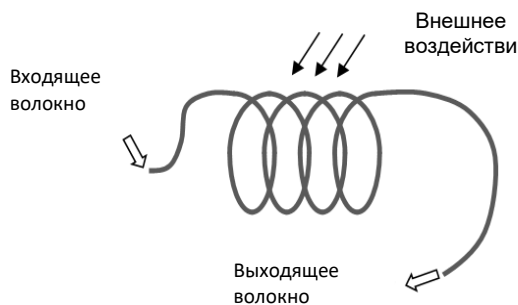


Рис. 7. Тип волоконно-оптического датчика: внутренний (волокно также действует как преобразователь)

Другая общепринятая классификация волоконно-оптических датчиков основана на том, позволяют ли они локально измерять интересующий физический параметр, и в этом случае они называются *точечными датчиками*, или предоставляют значение физического параметра на расстоянии и в зависимости от положения вдоль волокна – *распределенные датчики*. Точечные преобразователи имеют конечную длину и, следовательно, обеспечивают значение физического параметра, усредненное по заданному объему пространства, соответствующее длине точечного преобразователя. Если требуются многоточечные измерения, необходимо использовать несколько точечных датчиков, что во многих случаях требует установки нескольких входных/выходных волокон, набор детекторов и т. д. (Рис. 8а). Количество точечных датчиков, которое определяет пространственное разрешение системы, ограничено стоимостью и, следовательно, становится недостаточным для многих практических применений. Подход распределенного волоконно-оптического зондирования (рис. 8б) не имеет реального эквивалента среди других типов датчиков и стал важным отличительным признаком волоконно-оптического зондирования.

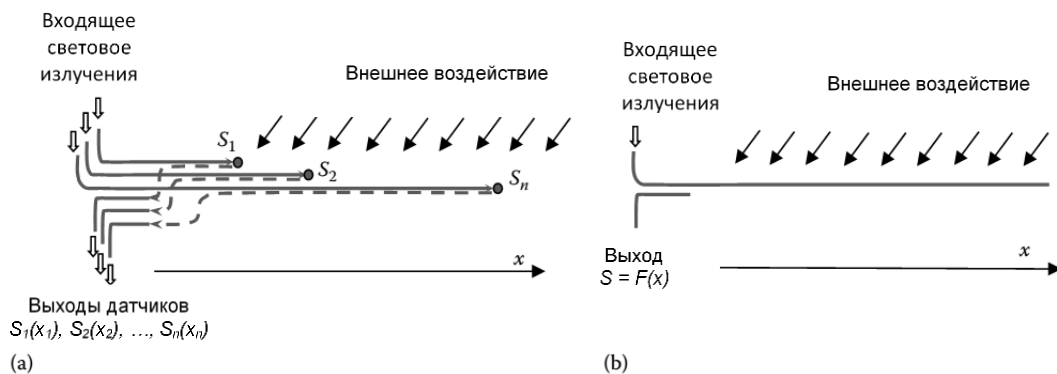


Рис. 8. Схематическое изображение: (а) точечного зондирования и (б) распределенного зондирования

Распределенные датчики чаще всего являются внутренними, а принципы и практическая реализация чувствительности значительно отличаются от тех, которые используются для точечного зондирования. Поскольку для определения интересующего физического параметра во многих точках необходимо установить только одно волокно, можно совместно использовать оптический источник и детектор и часто исключать другое оборудование, необходимое для многоточечного зондирования с использованием точечных датчиков. Это приводит к гораздо более низкой стоимости измерения на точку, а также к гораздо большей массе и пространственной эффективности распределенного зондирования, что делает этот метод наиболее мощным вариантом мониторинга во многих приложениях, осо-

бенно для структурного мониторинга гражданских и аэрокосмических конструкций [4].

На рисунках 9,11,12 представлен подробный обзор видов волоконно-оптических датчиков, приведены их параметры для измерения которых чаще всего используется каждый тип датчиков. На рис. 6 представлены различные типы ВОД с внешним чувствительным элементом или гибридные. В ВОД с внешним чувствительным элементом измерение параметров производится за пределами волокна. Датчик можно рассматривать как «черные ящики», при этом оптические волокна используются как световод для «ящиков» и данных – в обратном направлении. Датчики данного типа также можно рассматривать как «гибридные» волоконно-оптические датчики.



Рис. 9. Волоконно-оптические датчики с внешним чувствительным элементом или гибридные: свет передается на вход чувствительного элемента и принимается с его выхода с помощью волокна

Рисунок 9 иллюстрирует действия внешнего волоконно-оптического датчика. В этом случае оптическое волокно ведет к «черному ящику», который подает информацию на луч света в ответ на воздействие окружающей среды. Информация может быть значимо с точки зрения интенсивности, фазы, частоты, поляризации, спектрального содержания или других характеристик. Затем оптическое волокно передает свет вместе с информацией, подвергнувшись воздействию окружающей среды, обратно в оптический и/или электронный процессор. В некоторых случаях входное оптическое волокно также действует как выходное волокно (рис. 7).



Рис. 10. Принцип внешних волоконно-оптических датчиков

Используемый термин «чистоволоконный» указывает на то, что измерение производится внутри самого волокна.

Большой и важный подкласс датчиков, в которых оптическое волокно используется в качестве чувствительного элемента, или чистоволоконных датчиков – это интерферомет-

рические датчики, которые показаны на рис 9,11,12. Основные датчики обеспечивающие наиболее высокую производительность, относятся именно к этому подклассу [6].



Рис. 11. Датчики, в которых оптическое волокно используется в качестве чувствительного элемента, или «чистоволоконные» датчики

Из анализа рисунков 9,11,12 очевидно, что практически любое физическое или химическое явление может детально анализироваться после преобразования в оптический сигнал. Для измерения почти всех параметров внеш-

ней среды может применяться множество волоконно-оптических датчиков, использующих различные подходы. Часто проблема заключается в разработке датчика, который оценивал бы только требуемый параметр [6].



Рис. 12. Основные виды интерферометрических волоконных датчиков

Поток оптического излучения, проходящего через оптическое волокно, можно описать с помощью нескольких параметров, каждый из которых можно про модулировать независимо от других. Модулируются обычно такие параметры как интенсивность оптического потока, частота световых колебаний, фаза световой волны и угол поворота плоскости колебаний электрического (магнитного) поля

относительно вектора световой волны. Последние три необходимо модулировать непосредственно перед подачей их сигналов на фотоприемник.

Существуют волоконно-оптические сенсоры (ВОС), в которых в оптическое волокно включается ряд дискретных точечных чувствительных элементов (ЧЭ) под действием внешнего воздействия в которых возникает модуляция. ЧЭ

в таких ВОС могут служить, например, брэгговские внутриволоконные дифракционные решетки. Однако наибольший практический интерес вызывают ВОС, построенные на базе таких оптических эффектов, как рамановское рассеяние и рассеяние Манделштама-Бриллюэна. По существу эти измерительные преобразователи (ИП) делятся на два типа: **на основе вынужденного комбинационного рассеяния** (ИП температуры) и **на основе эффекта Манделштама-Бриллюэна** (ИП температуры и деформаций) [2].

Для расчета чувствительного элемента необходимо учитывать:

- диаметр волокна;
- числовую апертуру;
- коэффициенты пропускания или отражения чувствительных элементов и возникающие при этом потери света на границах раздела волокно-ЧЭ-волокно или волокно-ЧЭ (границы ЧЭ могут служить зеркалом). В качестве зеркала может также использоваться граница раздела ЧЭ-воздух или ЧЭ-вакуум;
- условия согласования источника оптического излучения фотоприемного устройства с волокном.

Для измерений важна структура именно чувствительного элемента, от того, как он спроектирован и изготовлен будет изменяться и измеряемая величина. Одним из видов ВОД являются датчики на основе внутриволоконных брэгговских решеток. Такая решетка представляет собой брэгговское зеркало, а именно, периодическую структуру показателя преломления, изготовленную непосредственно в сердцевине оптического волокна. Результат воздействия внешней среды на подобных датчиках преобразуется в световой сигнал внутри волокна.

Если ЧЭ не является внутриволоконной брэгговской решеткой, а в качестве ЧЭ используется, например, кремниевая пластина заданной конфигурации, то очень важно обеспечить правильное сочленение чувствительного элемента и волокна. Сочленение должно обеспечивать надежный контакт волокна и чувствительного элемента, а также выдерживать заданное положение чувствительного элемента относительно торца и оси оптического волокна.

Оптические эффекты, характер которых зависит от интенсивности излучения, называют нелинейными. Функционирование некоторых типов ВОД основано на ряде нелинейных эффектов, возникающих при распространении излучения в волокне. Нелинейные эффекты в оптическом волокне усиливаются с ростом интенсивности поля, т. е. мощности потока излучения приходящегося на единицу площади поперечного сечения сердцевины волокна.

Элементы, используемые в волоконно-оптических датчиках, являются абсолютно пассивными по отношению

к электричеству, что позволяет применять их в различных отраслях.

### Типы волоконно-оптических датчиков в зависимости от изменяемого свойства света

Кроме того, в зависимости от изменяемого свойства света, оптоволоконные датчики можно в основном разделить на четыре основные категории:

1. Датчик с модуляцией интенсивности
2. Фазомодулированный (интерферометрический) датчик
3. Волново-модулированный (спектрометрический) датчик
4. Поляризационно-модулированный (поляриметрический) датчик [6].

#### 1. Волоконно-оптические датчики с модуляцией интенсивности

Датчики с модуляцией интенсивности принадлежат к самым ранним типам и, возможно, самым простым типам оптоволоконных датчиков. В схеме модуляции интенсивности оптический сигнал передается через оптические волокна, а затем его интенсивность модулируется различными данными, такими, как изгиб волокна, коэффициент отражения или изменение среды, через которую передается свет. Основными преимуществами датчиков с модуляцией интенсивности являются простота их изготовления, простая система обнаружения и высокие требования к обработке сигналов. Простой пример волоконно-оптического датчика с модуляцией интенсивности отражающего типа, использующего одно волокно, которое можно использовать для измерения расстояния, давления и т.д., представлен на рисунке 13. По сравнению с одноволоконным датчиком отражения двухволоконного типа часто используются в качестве датчика приближения в различных областях применения. В этом случае одно волокно используется в качестве входного волокна, а второе волокно используется для сбора отраженного света от отражающей поверхности. Схема конфигурации с двумя волокнами и ее типичная характеристика интенсивности показаны на рисунке 14 [7].

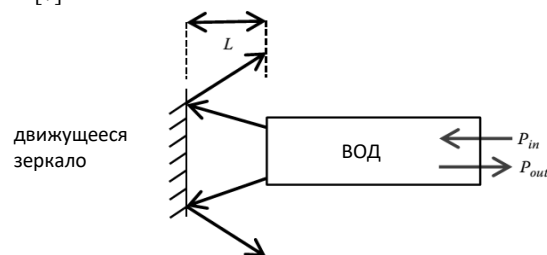
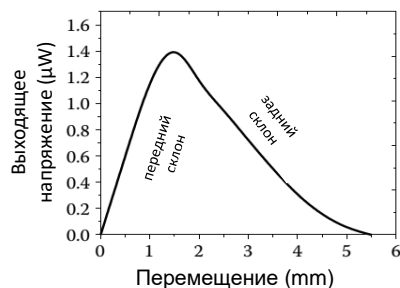


Рис. 13. Простой внешний датчик с модуляцией интенсивности.



а)



б)

Рис. 14 (а) Двухволоконный датчик отражательного типа и (б) его типичная характеристика

Функция модуляции двухволоконного датчика отражательного типа задается выражением [8]:

$$M_s = \frac{\Phi_{RS}}{\Phi_E} = \frac{S_R \cos^4 \theta}{\pi(2hNA)^2}, \quad (1)$$

где:

$\Phi_E$  - световой поток от излучающего волокна;

$\Phi_{RS}$  - световой поток, перехваченный торцом; приемного волокна

$S_R$  - площадь торца приемного волокна;

$\theta$  - угол между осью приемного волокна и линией, соединяющей центры приемного волокна и излучающего волокна (виртуальное изображение);

$NA$  - числовая апертура волокна.

В отличие от других принципов зондирования, модуляция интенсивности может быть получена с помощью простого устройства; однако изгиб оптического волокна, смещение связи, флуктуация мощности источника и т. д. могут вызвать ослабление сигнала и нестабильность интенсивности сигнала, что приводит к менее надежной системе датчиков. Одним из решений этой проблемы является коррекция интенсивности, при которой часть входного света (полученного с использованием волоконного разветвителя) используется для контроля колебаний входной мощности.

**2. Фазомодулированные оптоволоконные датчики**

Фазомодулированные датчики, также известные как интерферометрические датчики, работают на основе разности фаз когерентного света, проходящего по двум разным путям, в одном и том же волокне или в разных волокнах. Эти датчики часто рассматриваются как высокочувствительные датчики из-за их способности реагировать на небольшие изменения во внешних измерениях. Обычные интерферометрические оптоволоконные датчики включают волоконно-оптические интерферометры Маха-Цендера, Майкельсона, Фабри-Перо и Саньяка.

**3. Спектрометрические (на основе длины волны) оптоволоконные датчики**

Волоконные датчики с модулированной длиной волны демонстрируют изменение длины распространяющейся оптической волны (спектральная модуляция) при взаимодействии с внешним возмущением. Некоторые распространенные оптоволоконные датчики на основе длин волн включают датчики с решеткой Брэгга, датчики флуоресценции и датчики черного тела. Возможно, одним из наиболее широко используемых датчиков на основе длины волны является датчик с решеткой Брэгга. Волоконные брэгговские решетки (FBG) вписываются в оптическое волокно, вызывая периодические изменения показателя преломления в сердцевине [9]. Периодическая индексно-модулированная структура позволяет соединять свет от основной распространяющейся моды в прямую распространяющуюся

щуюся базовую моду, создавая реакцию отражения. Отраженная длина волны Брэгга чувствительна к ряду физических параметров, и, таким образом, FBG может использоваться в качестве датчика в различных приложениях.

Флуоресцентные волоконно-оптические датчики широко используются для физического и химического измерения таких показателей, как температура, влажность и вязкость. Среди различных используемых конфигураций двумя наиболее распространенными являются датчик концевой наконечника и тип полости черного тела [10]. В датчике черного тела, полость черного тела размещается на конце оптического волокна [11], и, когда температура полости увеличивается, она начинает светиться и действует как источник света. Используя подходящие детекторы и узкополосные фильтры, можно определить профиль кривой черного тела который предоставляет измеряемую информацию. Благодаря возможности измерять температуру с точностью до нескольких градусов Цельсия в интенсивных радиочастотных полях, этот тип датчиков разработан в качестве оптоволоконных термометров и успешно коммерциализирован.

**4. Поляриметрические оптоволоконные датчики**

Хорошо известно, что когда световая волна распространяется вдоль оптического волокна, ее состояние поляризации изменяется из-за разности фазовых скоростей двух поляризационных компонентов в двулучепреломлящем волокне. На поляризационные свойства света, распространяющегося через оптическое волокно, могут влиять напряжение, деформация, давление и температура, действующая на него, и в волоконно-поляриметрическом датчике измеряется изменение состояния поляризации и используется для получения параметра считывания [11]. Эффект симметричной деформации или изменения температуры в одномодовом волокне влияет на постоянную распространения ( $\beta$ ) для каждой моды из-за изменений длины волокна ( $L$ ) и показателей преломления сердечника и оболочки. Под влиянием продольной деформации ( $\epsilon$ ) или температуры ( $T$ ) для одномодовых волоконно-поляриметрических датчиков изменение разности фаз можно записать как [13]:

$$\frac{\delta(\Delta\Phi)}{\delta X} = \Delta\beta \frac{\partial L}{\partial X} + L \frac{\partial(\Delta\beta)}{\partial X}, \quad (2)$$

где  $X$  обозначает температуру, давление или напряжение.

Волоконно-оптический поляриметрический датчик, который работает в области интенсивности с использованием устройства поляризатор-анализатор, показан на рисунке 15. В типичном поляриметрическом датчике линейно поляризованный свет запускается под углом  $45^\circ$  к главным осям двулучепреломляющего волокна, так что обе поляризационные моды могут быть одинаково возбуждены.

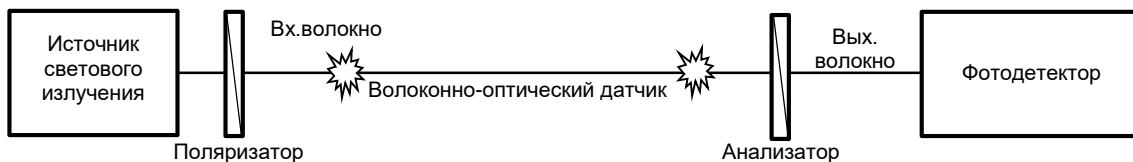


Рис. 15 Схема типичного поляриметрического волоконного датчика.

Состояние поляризации на выходе преобразуется в интенсивность с помощью поляризатора-анализатора, ориентированного под углом  $90^\circ$  к состоянию поляризации на входе. Для таких поляриметрических датчиков изменение интенсивности излучения на длине волны  $\lambda$  из-за приложенного извне возмущения можно описать формулой:

$$I_s(\lambda) = \frac{I_0}{2} [1 + \cos(\Delta\Phi)] \quad (3)$$

Следовательно, изменение поляризации можно интерпретировать как изменение интенсивности и, соотнося, изменение выходной интенсивности по интенсивности с измеряемой величиной, можно эффективно использовать датчик поляриметрического волокна в качестве датчика для различных применений. Разность фаз между двумя ортогональными



поляризациями также может быть использована в экспериментальной установке, состоящей из перестраиваемого лазерного источника и системы управления поляризатором/поляризацией.

В поляриметрических волоконных датчиках обычно используются оптические волокна с высоким двулучепреломлением, такие как панда, бабочка и эллиптическое ядро или поляризационные фотонно-кристаллические волокна. Из-за высокой чувствительности поляриметрических волоконных датчиков к внешним параметрам, таким как напряжение и температура, часто перекрестная чувствительность является серьезной проблемой для этих типов датчиков. Способность поляриметрических волоконных датчиков измерять деформацию, температуру и давление демонстрируется в различных областях применения. Волоконно-поляриметрические датчики также используются для измерения тока и напряжения, где используется ряд поляризационных эффектов (оптическая активность, эффект Фарадея и электрооптический эффект).

### Заклучение

Мониторинг структурного состояния сооружений является самым мощным средством инфраструктурного управления, поскольку устраняет разрыв между традиционным инженерным проектированием и информационными технологиями. Определение и контроль ключевых параметров, таких как деформация и вибрация, вызываемых внешними воздействиями, являются основой для разработки и калибровки существующих инженерных моделей, описывающих механизм ухудшений, угрожающих перейти установленные допуски и пределы и развиваться в аварии и катастрофы. Дополнительными преимуществами ВОД в структурном мониторинге инженерных сооружений является высокое качество измерений и повышенная надежность, упрощение и снижение расходов эксплуатации. Учет таких свойств ВОС позволяет их применять к системам непрерывного мониторинга земного грунта по склонам, особенно к оползневым процессам. Определение состояния грунтовых слоев мест возникновения оползней даёт возможность своевременного предупреждения об опасности появления аварий жителей, проживающих вдоль опасных территорий.

### Использованная литература

1. Бердиев А.А. «Классификация и применение волоконно-оптических датчиков» «Иқтисодийётнинг тармоқлари инновацион ривожланишида ахборот-коммуникация технологияларининг аҳамияти» Республика илмий-техник анжуманининг маърузалар тўплами, 3-қисм. 14-15 март 2019 йил Тошкент. – 237-239 Б.
2. Т.Г. Рахимов, Бердиев А.А. «Оповещение населения и организация методов систем связи в чрезвычайных ситуациях с помощью оптоволоконных измерительных систем» «Иқтисодийётнинг тармоқлари инновацион ривожланишида ахборот-коммуникация технологияларининг аҳамияти» Республика илмий-техник анжуманининг маърузалар тўплами, 3-қисм. 14-15 март 2019 йил Тошкент. – 321-324 Б.
3. Буймистряк Г.Я. «Информационно-измерительная техника и технология на основе волоконно-оптических датчиков и систем» Монография – СПб: ИВА, ГРОЦ Минатома, 2005 – С 21-25.
4. Т. Окуси. Волоконно-оптические датчики. Ленинград ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ 1991. – С 12-14.
5. Yuliya Semenova, Gerald Farrell “Optical Fiber Sensing Solutions From Macro- to Micro-/Nanoscale” OPTICAL FIBER SENSORS. edited by Ginu Rajan. International Standard Book Number-13: 978-1-4822-2829-8, UNSW Australia. – P 33-34.
6. Волоконно-оптические датчики. Вводный курс для инженеров и научных работников. Под ред. Эрика Удда. Технофера. Москва 2008.-520 с. ISBN 978-5-94836-191-8. – С 14-17.
7. Ginu Rajan, “Introduction to Optical Fiber Sensors” OPTICAL FIBER SENSORS. edited by Ginu Rajan. International Standard Book Number-13: 978-1-4822-2829-8, UNSW Australia. – P 22-24.
8. Zhao, Z., Lau, W. S., Choi, A. C. K., and Shan, Y.Y., Modulation functions of the reflective optical fiber sensor for specular and diffuse reflection, Optical Engineering, 33(9), 2986–2991, 1994.
9. Schwab, S. D. and Levy, R. L., In-service characterization of composite matrices with and embedded fluorescence optrode sensor, Proceedings of SPIE, 1170, 230, 1989.
10. Grattan, K. T. V., Selli, R. K., and Palmer, A. W., A miniature fluorescence referenced glass absorption thermometer, in Proceedings of the Fourth International Conference on Optical Fiber Sensors, Tokyo, Japan, 1986, p. 315.
11. Rao, Y. J., In-fibre Bragg grating sensors, Measurement Science and Technology, 8(4), 355–375, 1998.
12. Wolinski, T. R., Polarimetric optical fibers and sensors, Progress in Optics, 40, 1–75, 2000.
13. Wolinski, T. R., Lesiak, P., and Domanski, A. W., Polarimetric optical fiber sensors of a new generation for industrial applications, Bulletin of the Polish Academy of Sciences, Technical Sciences, 56(2), 125–132, 2008.

### Информация об авторах:

**Рахимов Т.Г.** – доцент кафедры СТРВ Ташкентского университета информационных технологий им. Мухаммада-ал Хорезми.

**Рахимов Б.Н.** – д.т.н. доцент, зам. начальник Военного института информационно-коммуникационных технологий и связи.

**Бердиев А.А.** – докторант Ташкентского университета информационных технологий им. Мухаммада-ал Хорезми. [berdiyevvalisher18@gmail.com](mailto:berdiyevvalisher18@gmail.com)

**Мирсагдиев О.А.** – PhD, кафедры АТИТТ на ЖДТ Ташкентского института инженеров железнодорожного транспорта. [oamirsagdiev@yandex.ru](mailto:oamirsagdiev@yandex.ru)

**Rakhimov T.G., Rakhimov B.N., Berdiev A.A., Mirsagdiev O.A.**

**Information-measuring equipment based on fiber-optic sensors and systems**

**Annotation.** Monitoring the conditions of an investigated or observed object has become a key technology in many areas, from entertainment technology to healthcare, transportation and many industrial technologies, as well as in many such advanced applications where miniaturization, sensitivity and remote sensing are vital. Monitoring methods based on optical fiber can provide new solutions, which, in turn, actualizes additional research.

This article is devoted to an extensive review of the types of fiber optic sensors used in various areas of structural monitoring of engineering structures. Fiber optic fibers are considered in different application conditions, and the advantages of fiber-optic sensors over conventional electronic sensors are listed. The point, distributed and quasi-distributed types of fiber sensors were studied. In addition, the classification of fiber-optic sensors according to the type of sensitive optical parameters and the type of interaction with the



measured medium is considered. And also provides information on the types of fiber-optic sensors, depending on the variable properties of light.

**Keywords:** sounding, fiber optic sensors, Bragg gratings, pure fiber optical sensors, photocurrent strength, fiber optical fibers.