

Сенсорные пассивные оптические сети и ключевые вопросы применения в них волоконных брэгговских решеток

И.И. Нуреев

*Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева-КАИ*

Аннотация: Рассматриваются принципы построения сенсорных пассивных оптических сетей, реализующих концепцию единого поля комплексированных волоконно-оптических датчиков на основе гибридного волнового и временного мультиплексирования. Показаны их преимущества в сравнении с классическими технологиям однопараметрического мультиплексирования по времени, длине волны, частоте, пространству, кодам и т.д. Представлены прототипы и структура сенсорной пассивной оптической сети с гибридным волновым и временным мультиплексированием, показана возможность опроса датчиков точечного, квази-распределенного и распределенного типа, как с помощью зондирующих сигналов импульсного, так и непрерывного типа. Особо рассмотрены вопросы зондирования последовательно расположенных однотипных брэгговских решеток с использованием механизмов послонного исключения (импульсное зондирование) и измерения добротности их общей огибающей спектра (непрерывное амплитудно-фазовое зондирование). Определены требования к построению сенсорных пассивных оптических сетей на основе гибридного волнового и временного мультиплексирования в части согласования параметров разнотипных брэгговских решеток и мультиплексоров на базе упорядоченных волноводных решеток по длине волны, основанных на возможности использования последних как опорных структур для интеррогации первых. Представлены варианты построенных сетей и их характеристики.

Ключевые слова: единое поле комплексированных волоконно-оптических датчиков, сенсорная пассивная оптическая сеть, гибридное временное и волновое мультиплексирование, импульсное и непрерывное зондирование, волоконная брэгговская решетка, упорядоченная волноводная решетка.

Введение

Развитие техники волоконно-оптических датчиков (ВОД) и особенно волоконных брэгговских решеток (ВБР) неразрывно связано с развитием техники волоконно-оптических систем связи [1]. Возросшие возможности телекоммуникационных технологий позволяют создавать пространственно-разнесенные и многомерные сенсорные сети на их основе, применяемые в системах структурного мониторинга инженерных сооружений [2], бортовых системах контроля параметров скоростных транспортных средств [3], охраны периметра и решения экологических задач [4] и т.д. Благодаря присущим ВБР преимуществам, таким как компактный размер, малый вес,

невосприимчивость к электромагнитным помехам, простота коммуникаций и мультиплексирования, определенным природой оптического волокна, они лежат в основе измерения температуры, механических деформаций, коэффициента преломления и многих других, сводимых к указанным, величин. В 2016 году рост рынка применения ВОД, в том числе на основе ВБР, может достичь 3,36 миллиона установленных датчиков [1].

Классически ВОД можно разделить на три больших группы: точечные, квази-распределенные и распределенные. Точечные ВОД на основе ВБР или их квази-распределенная последовательность условно представляют собой устройства с кодированием «длина волны – измеряемая величина» и, как правило, преобразуют в измеряемую величину сдвиг центральной длины волны спектрального резонансного отклика, либо некоторой спектральной резонансной особенности в нем [5]. При этом распределенные ВОД по методам интеррогации не сильно отличаются от ВБР, поскольку имеют схожую с ними природу информативного контура, а именно сверхузкополосный контур усиления Мандельштама-Бриллюэна или сверхширокополосный контур стоксовой и антистоксовой составляющих рассеяния Рамана [6]. Поэтому объединение всех трех типов ВОД в единую сенсорную сеть представляется вполне обоснованным и перспективным.

Интеррогаторы – приборы, с помощью которых опрашиваются ВБР, строятся, как правило, на основе сложных дорогостоящих устройств: оптических анализаторов спектра (ОАС), сканирующих или пространственных оптических фильтров с ПЗС, оптического узкополосного фильтра с зависящей от длины волны спектральной характеристикой склона [5]. В последнее время развиваются более простые и дешевые методы, основанные на импульсной временной рефлектометрии ВБР [7-9] и амплитудно-фазовой непрерывной симметричной двухчастотной рефлектометрии [10-12]. Равновероятность их применения требует

использования в сенсорных сетях технологий как временного, так и волнового или частотного мультиплексирования.

Существенным различием между импульсными и непрерывными методами является «широкополосность» первых и «узкополосность» вторых. Взятые в кавычки термины означают, что для определения центральной длины волны ВБР и в первом, и во втором случае достаточно двух частотных составляющих – межмодовых в импульсе и специально синтезированных с помощью метода амплитудно-фазового преобразования Ильина-Морозова [13] при непрерывном зондировании, разностная частота которых лежит в одинаковых пределах единиц-десятков ГГц. Эта общность позволяет отнести указанные методы к радиотонным [5]. Различие заключается в том, что в импульсе таких составляющих по спектру множество, и зондирование ВБР с различными длинами волн не требует сканирования или перестройки излучения, а в двухчастотном излучении всего две, что требует применения комб-генераторов и полигармонических методов для зондирования ВБР [14] или наложения более жестких условий на разнообразие спектральных характеристик ВБР – применения однотипных ВБР, настроенных на одну длину волны, с относительно невысоким коэффициентом отражения (от – 20 до – 40 дБ [15, 16]).

Последнее требование с одной стороны выглядит как ограничение, а с другой позволяет придать некоторую универсальность сенсорным сетям. Дополнительным фактором, позволяющим положительно решить вопрос в пользу последнего решения, является широкое использование в волоконно-оптических телекоммуникационных сетях мультиплексоров и демультимплексоров на основе упорядоченных волноводных решеток (УВР), которые имеют жестко определенные спектральные параметры в отношении ширины каналов – 12,5, 25, 50, 100, 200 ГГц. Указанные значения ширины каналов УВР хорошо коррелируют с диапазоном разностных частот,

используемым в радиофотонных методах интеррогации ВОД на основе ВБР, указанных выше.

Приведенные аргументы и требования к построению сенсорных сетей однозначно указывают на необходимость рассмотрения возможности их создания на основе концепции единого поля комплексированных ВОД [17] и телекоммуникационных пассивных оптических сетей (ТПОС) с временным и волновым уплотнением [18], что и является целью настоящей работы.

В первом разделе работы будут представлены основы концепции единого поля комплексированных ВОД, во втором – принципы построения гибридных ТПОС с временным и волновым мультиплексированием. В третьем разделе будут детально рассмотрены принципы импульсного и непрерывного зондирования последовательности однотипных ВБР с помощью алгоритмов послойного удаления и измерения добротности их общего контура отражения. В четвертом разделе будут определены требования к построению сенсорных пассивных оптических сетей (СПОС) и их стандартизации, в части возможного использования УВР, как опорной структуры для интеррогации множества датчиков на основе ВБР. В заключении кратко подведены итоги представленной работы и возможные направления развития рассмотренных вопросов.

Единое поле комплексированных ВОД

Концепция единого поля комплексированных ВОД была представлена в [17] для бортовой волоконно-оптической сети контроля параметров безопасности скоростных транспортных средств.

По аналогии с [17] общими тенденциями развития СПОС являются:

- необходимость контроля значительного количества датчиков и исполнительных устройств, что определяется требованиями оперативности контроля и управления, повышением плотности средств измерения и диагностики;

- пространственное распределение средств управления и контроля по объему контролируемого объекта и их временная синхронизация с высокой точностью;

- возрастание информационных потоков между блоками сети в каналах управления и обработки информации, работающих в реальном масштабе времени;

- повышение требований к сроку службы и надежности агрегатов и узлов контролируемого объекта с учетом их возрастающей сложности.

В этих условиях актуальной становится задача комплексирования ВОД и создания их единого поля для улучшения качества контроля параметров объекта (напряжений, температур, скоростей, прочности и т.д.) с помощью СПОС.

Под единым полем комплексированных датчиков будем понимать множество ВОД, расположенных в контрольных зонах объекта или технологически встроенных в его узлы и агрегаты, позволяющих получать с одного датчика информацию об одном или нескольких физических процессах и соединенных в общую СПОС интеррогации, передачи и обработки информации, управления и синхронизации.

С одной стороны, перспективность создания единого поля комплексированных датчиков определяется свойствами созданных одномодовых ВОД, их универсальной чувствительностью к воздействию различных физических полей: механических, температурных, акустических и др. С другой стороны, возможностями многомодовых волокон в связных системах, их устойчивостью к воздействию внешних помех и стабильностью к изменению условий эксплуатации. И, наконец, особо следует выделить наличие широкого круга волоконно-оптических и радиофотонных устройств обработки (сетевые интерфейсы, АЦП, интегрально-оптические процессоры, мультиплексоры и т.д.) и преобразования информации (пространственно-

временные, амплитудно-кодовые, спектрального уплотнения и т.д.), которые позволят объединить отдельные элементы единого поля и их информационные потоки в СПОС.

Вполне естественно, что требования к отдельным элементам единого поля могут быть различны (например, избирательная чувствительность к регистрируемому воздействию). Однако в целях универсального применения и простоты реализации датчики поля должны обладать позиционной чувствительностью, то есть возможностью получения информации с пространственным разрешением. Наибольший интерес с данной точки зрения представляют собой протяженные датчики, реализуемые на базе методов обратного и нелинейного рассеяния, которые сочетают в себе свойства волокна как многоточечного датчика и одновременно как линии передачи информации. Дополнительным преимуществом является необходимость доступа лишь к одному концу ВОД. Не менее интересной является задача интеррогации однотипных ВБР, настроенных на одну длину волны.

СПОС с гибридным временным и волновым мультиплексированием

В настоящее время разработчики сенсорных сетей, управляемые идеей унификации, отдают предпочтение структурам, построенным на использовании отдельных или комбинации однопараметрических видов мультиплексирования: временного, волнового, частотного, с кодированием пространственного и т.д. [1]. Полученные структуры являются базисом для построения СПОС, но не всегда отражают концепцию единого поля, зачастую представляя собой устройства для опроса нескольких сотен или тысяч разнотипных точечных датчиков [19]. Поэтому особого рассмотрения требует концепция построения нового поколения ТПОС [18], тем более, что в их структуре, как правило, содержится встроенная система мониторинга, содержащая различные ВОД [20-23].

ТПОС представляет собой сеть типа «точка-многоточка», состоящую из оптического линейного терминала (ОЛТ) на стороне провайдера услуг и нескольких, как правило, 32, 64, 128 оптических сетевых терминалов или узлов (ОСТ/У) на стороне абонента (IEEE 802.3ah, ITU-T G984.1), соединяемых оптической подсетью распределения (ОПР).

ТПОС являются основным физическим уровнем для предоставления услуг по технологиям FTТх. Их отличительной чертой являются: отсутствие источников питания для поддержания собственной работоспособности, низкие эксплуатационные расходы, широкая полоса пропускания.

Оптическая подсеть распределения ОПР, соединяющая ОЛТ и ОСТ/У, представляет собой набор оптических пассивных устройств, реализующих соответственно функции 1×32 , 1×64 , 1×128 . В течение последних 20 лет рабочие группы FSAN и ITU определили несколько стандартов ПОС, включая В-PON, G-PON, XG-PON, основанных временном мультиплексировании (TDM) и на двунаправленной организации передачи информации с использованием двух или больше длин волн по одному волокну (рис. 1). Восходящие и нисходящие потоки разделяются соответствующими каждому стандарту селективными устройствами на ОЛТ и ОСТ/У, в то время как ОПР всегда представляет собой набор сплиттеров, а применение в них селективных по длине волны устройств были запрещены. Таким образом, реализовывалась совместимость всех поколений ТПОС по TDM.

Впервые нарушение этого правила возникло при разработке ТПОС с волновым мультиплексированием (WDM), в которых в ОПР используются волновые селекторы, например, УВР, а каждому ОСТ/У соответствует своя длина волны (рис. 2).

ТПОС с WDM характеризуются с одной стороны большей полосой пропускания и меньшими энергетическими потерями в ОПР, с другой

сильной температурной зависимостью характеристик оптических спектральных элементов: фильтров, УВР, лазеров и т.д., что приводит к потерям в полосе пропускания и скорости передачи информации, а также необходимостью создания системы мониторинга в слое мониторинга оптических характеристик.

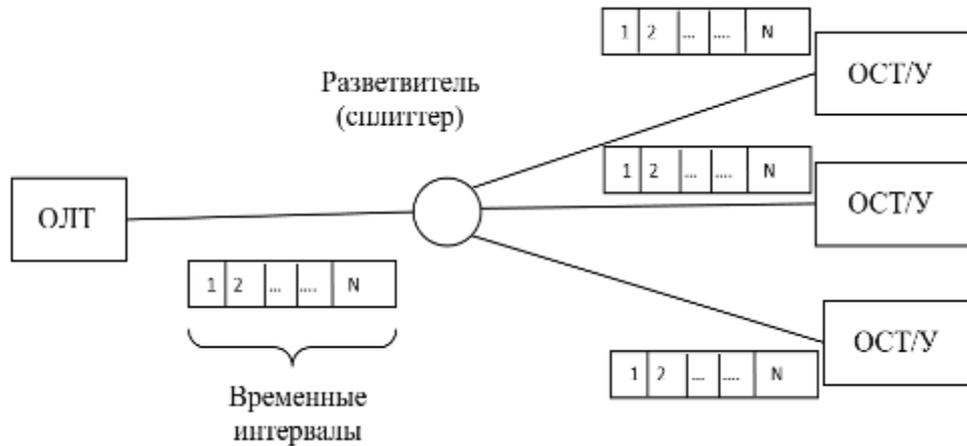


Рис. 1 – ТПОС с временным мультиплексированием (TDM)

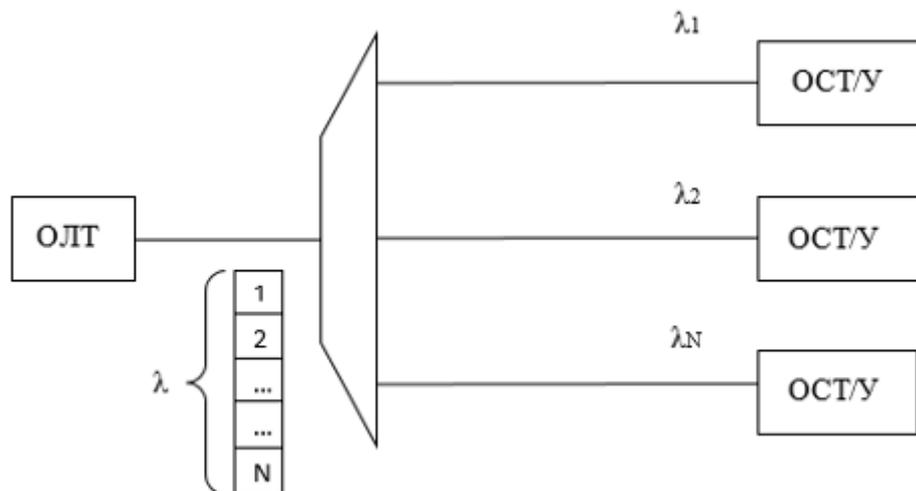


Рис. 2 – ТПОС с волновым мультиплексированием (WDM)

Новое поколение ТПОС характеризуется выбором смешанной гибридной структуры сети, основанной на преимуществах систем с волновым и временным мультиплексированием (TWDM), представленной на рис. 3.

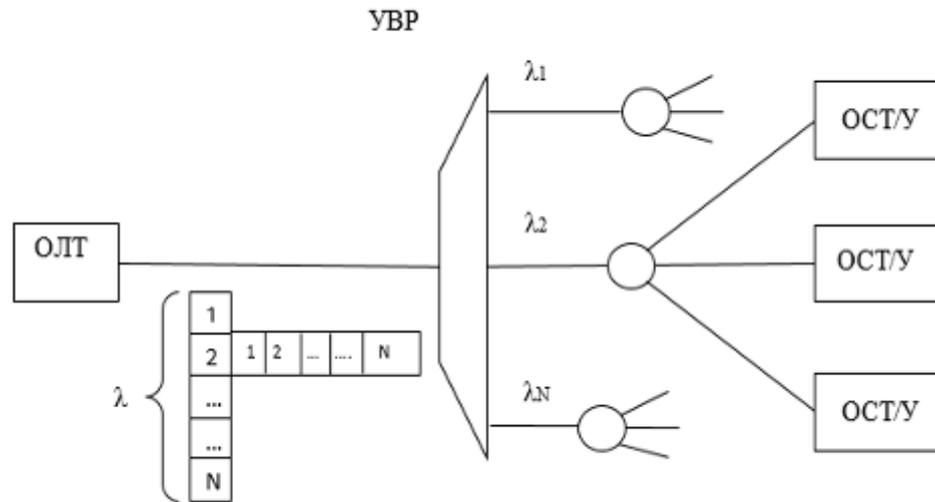


Рис. 3 – ТПОС с гибридным мультиплексированием (WDM)

Современные ТПОС второго поколения (рис. 3) должны обеспечивать: скорость передачи данных по сети до 40 Гбит/с; скорость передачи данных абоненту до 1 Гбит/с; дальность связи 40-60 км; число ОСТ/У – до 256. Системы мониторинга, применяемые в ПОС, можно разделить на три слоя: обнаружения дефектов и их локализации; мониторинга оптических (спектральных) характеристик; управления и эксплуатации. Основной целью нашей работы является использование принципов построения и характеристик второго слоя – мониторинга оптических (спектральных) характеристик ТПОС как прототипа для построения СПОС.

Для разработки СПОС и требований к ней были проанализированы разнообразие существующих структур систем мониторинга ТПОС, решаемые ими задачи и варианты построения на основе обзорных и исследовательских работ, представленных в существующих монографиях и научно-технической периодике, патентах. Каждый ОСТ/У заменен на ВОД или группу ВОД точечного, квази-распределенного или распределенного типа, которые могут быть мультиплексированы по времени или по длине волны.

Обобщенные требования к структуре, функциональному назначению, эксплуатационным, спектральным и метрологическим характеристикам СПОС можно выразить следующими положениями.

СПОС это:

1. Система, реализующая централизованную удаленную интеррогацию точечных, квази-распределенных и распределенных датчиков, использующая преимущества гибридного мультиплексирования;

2. В оптимальном варианте узкополосная система интеррогации, использующая преимущества волнового мультиплексирования, работающая в узкой полосе частот с минимальной стоимостью обслуживания;

3. В оптимальном варианте система интеррогации, использующая преимущества временного мультиплексирования, позволяющая обслуживать 64, 128 или 256 датчиков по одной ветви;

4. Система интеррогации, «прозрачная» для потока данных, синхронизирующей и служебной информации, информации встроенной системы мониторинга и других служб ПОС;

5. Система интеррогации, характеризующаяся требуемыми параметрами надежности, отражающими ее возможность поддерживать свою работоспособность в заданном интервале времени;

6. Простая система интеррогации, как в изготовлении, так и в установке и эксплуатации;

7. Адаптивная система интеррогации, позволяющая просто наращивать свою инфраструктуру при изменении инфраструктуры расположения датчиков и их типов, включая каскадирование;

8. Система, использующая встроенную подсистему мониторинга для определения кабельных повреждений при древовидной структуре, их локализации без использования активных элементов.

Методы опроса однотипных ВБР

Минимизация количества каналов, задействованных для обслуживания физического уровня измерений, является одной из важных задач при проектировании СПОС. При сохранении метрологических требований к элементной базе системы, наличие свободных каналов позволяет реализовать резервирование транспортного уровня, организовать каналы обратной связи, оперативно менять конфигурацию системы, вводить новые группы датчиков, например, регистрации возгорания, экологического мониторинга и т.д.

Для минимизации могут быть использованы структуры каналов, содержащие однотипные датчики, объединенные в группы в определенном порядке с изменяющимся по определенному закону коэффициента отражения, ширины полосы пропускания ВБР и т.д. При этом подразумевается спектральный анализ получаемой информации [24]. Двухчастотное зондирующее излучение не использовалось ранее для построения систем получения информации с группы однотипных датчиков. Однако использование непрерывного лазерного излучения позволяет предположить возможность использования частотного мультиплексирования для реализации системы, даже если все решетки в волокне канала будут одинаковы [16, 19].

При такой реализации соблюдаются требования по универсальности элементной базы физического уровня, транспортных магистралей и единства модулей программного обеспечения СПОС. При этом стоимость типовой реализации СПОС, построенной на основе методов двухчастотного или полигармонического зондирования ВОД на ВБР, в 3-5 раз меньше стоимости типовой широкополосной системы спектрального анализа на оптическом анализаторе спектра EXFO. Может быть использован один лазерный излучатель на несколько каналов измерений. В каждом канале может быть установлено до 5 однотипных датчиков.

Однако проблемой такого решения может являться наличие большого количества переотражений между ВБР, которые будут определять уровень перекрестных помех системы.

Воспользуемся методом послойного анализа для минимизации перекрестных помех при импульсном зондировании [25].

Алгоритм метода представлен на рис. 4.

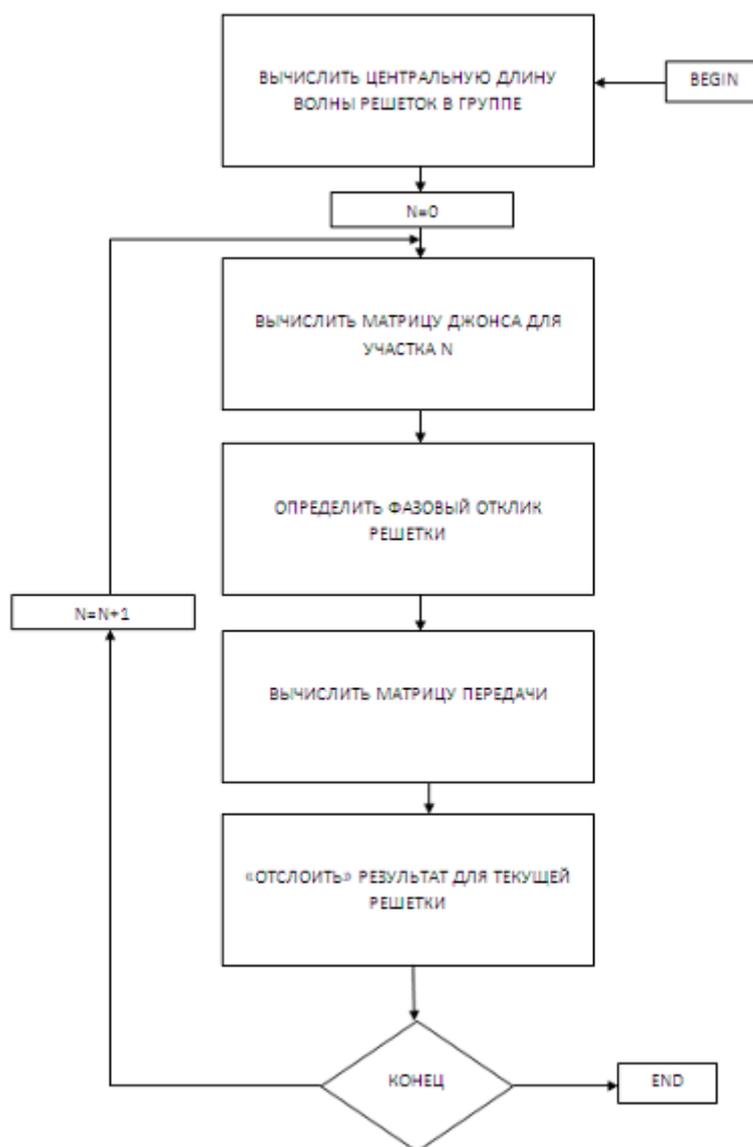


Рис.4 – Алгоритм послойного вычисления отклика группы ВБР

Алгоритм послойного вычисления основан на допущении, что только отражение от первой ВБР определяет основной вклад в первой точке отклика группы однотипных датчиков канала, поскольку последующие отражения приходят со значительной временной задержкой. На шаге 1 по первому отраженному сигналу вычисляется матрица Джонса для отрезка волокна B_0 и первой ВБР ρ_0 . По детерминанту B_0 и разности частот зондирующего и принятого сигнала в первой точке вычисляется фаза первой ВБР на шаге 2. Фаза первой точки для начала отсчета принята равной 0. На шаге 3 по матрицам B_0 и ρ_0 вычисляется матрица распространения и матрица обратного рассеяния для следующего участка волокна и следующей ВБР. После нахождения данных матриц может быть определено оптическое поле на следующей секции и первая ВБР может быть «отслоена». Данная процедура удаляет все вычислительные результаты, связанные с первой ВБР. На следующем шаге 4 определяется наличие следующей секции датчиков. Если датчик имеется, вторая ВБР становится первой и находятся матрицы Джонса для участка волокна B_1 и новой решетки ВБР ρ_1 . Процесс повторяется пока все фазы и матрицы не будут рассчитаны.

При анализе данного расчета следует учесть, что все величины не учитывают поляризацию в волокне, поэтому начальная фаза равна 0, а начальные величины являются скалярными. Отражение в ВБР задается ранее определенным при ее изготовлении коэффициентом отражения, участки волокна оцениваются по потерям.

Нами было выполнено имитационное моделирование для случая пяти однотипных решеток. Пять однотипных ВБР1-ВБР5 представляли решетку с опорным датчиком на рефлекторе и группой измерительных датчиков, разделенных отрезками волокна. Длина L была выбрана так, чтобы отклик от опорного датчика рефлектора не перекрывался с откликом от первой ВБР1 и

определялся как реперный. Таким образом, мы имели набор из пяти отражателей, разделенных волоконными отрезками с длиной d . Из спектра отраженного сигнала $r(k)$ были восстановлены амплитуды отраженных сигналов с каждого рефлектора ρ_i , где $i=1,2,\dots,N$, $k=2\pi/\lambda$ – волновое число. Эта задача обратного рассеяния имеет дискретную природу и была решена с помощью алгоритма последовательного отслоения. Обратная ей задача – задача получения спектра $r(k)$ из амплитудных коэффициентов ρ_i – с помощью метода обратных матриц.

Важное замечание – для реализации алгоритма решетки имели коэффициент отражения $\sim 5\%$. Это объясняется как энергетическими, так и интерференционными свойствами системы (основное назначение – уменьшение «хвостов» переотражений от второго и последующих датчиков).

Представленный и проверенный алгоритм может быть включен в программное обеспечение СПОС и использован для минимизации каналов. Применимость такого решения на физическом уровне определяется использованием датчиков для контроля зон с достаточно стабильными параметрами, к которым относится СПОС медленноменяющихся величин (полей температур, давления, влажности в системах складирования и т.д.).

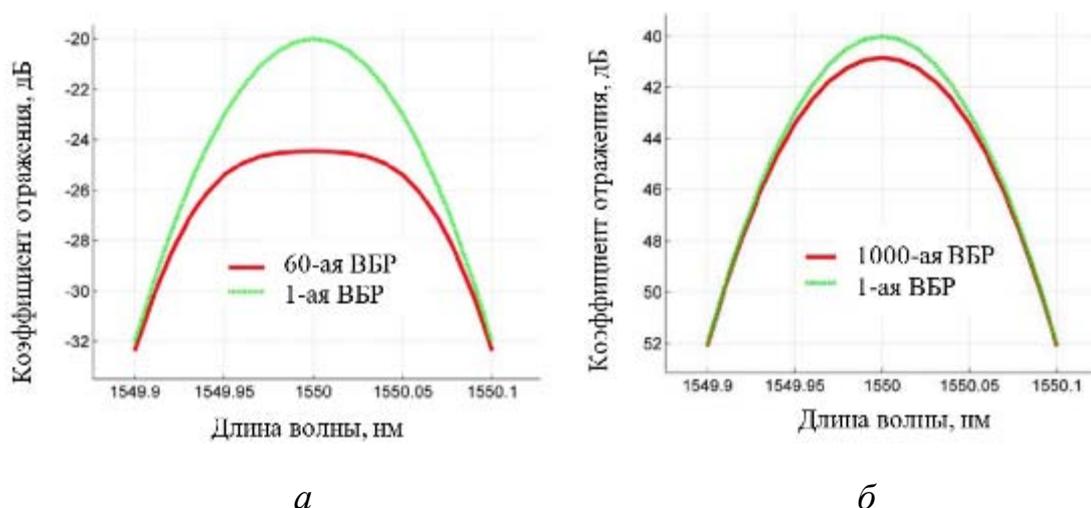
В описанной выше задаче число ВБР было неизменно. Нами в ряде работ [26-30] рассмотрены задачи с изменяющимся в процессе измерений числом ВБР в последовательности. Эти работы относятся к исследованию ВОД износа трущихся поверхностей, в частности щеток электродвигателей. Например, в одном приводном двигателе колеса автомобиля БЕЛАЗ может быть установлено до 32 таких датчиков, а с учетом всех восьми колес – до 256.

Огибающую спектра для нескольких слабоотражающих последовательно расположенных решеток ВБР можно определить, как в [31]:

$$I_{ri}(\lambda) = (1 - R(\lambda))^{2(i-1)} R(\lambda) \cdot I_0(\lambda) \quad (1)$$

где $R(\lambda)$ – коэффициент отражение решетки; i – количество решеток; $I_0(\lambda)$ – спектральная интенсивность источника излучения. Отметим, что температурные соотношения в этом случае характерны для каждой из ВБР, спектральные характеристики которых отражены в (1). Учтем также, что они сохраняются и при изменении общей длины одной ВБР L . Изменение фактора i при изменении общей длины ВБР (происходит “стирание” решеток) приводит к изменению “общей” ширины спектра ВБР в (1) – частотный параметр измерений, а также к изменению величины коэффициента отражения $R(\lambda)$ – амплитудный параметр измерений.

Описанные в (1) зависимости брэгговской структуры были использованы нами для моделирования измерительных характеристик датчика износа в среде Mathcad. Анализ полученных результатов показал, что при уменьшении количества решеток общий коэффициент их отражения увеличивается, а спектр огибающей сужается и брэгговская структура приобретает форму одинарной ВБР при износе четырех первых в последовательности решеток. Проиллюстрируем это результатами близких исследований, полученными в работе [31] и представленным на рис. 5.



а *б*
Рис. 5 – Огибающая спектра для одноступенчатых ВБР
с коэффициентом отражения – 20 дБ (а) и – 40 дБ (б)

Анализ рис. 5 позволил синтезировать метод определения числа ВБР в последовательности, основанный на определении добротности общего контура для огибающей спектра последовательно установленных ВБР.

Определяя положение центральной частоты двухчастотного излучения относительно центральной частоты решетки, можно определить полосу пропускания последовательности, которая зависит от числа решеток. Для этого предложен метод вариации разностной частоты [32], основанный на соотношении:

$$Q_{1,2} = \frac{v_{FBG}}{f_1 - f_2} \sqrt{\frac{i_{out(v_{FBG})}}{i_{out1,2}} - 1}, \quad (2)$$

где $i_{out(v_{FBG})}$ и $i_{out1,2}$ – амплитуды максимума огибающей спектра и компонент двухчастотного излучения на выходе фотоприемника, когда центральная частота составляющих f_1 и f_2 настроена на центр спектральной характеристики. Значения $i_{out1,2}$ определяются по выходным сигналам фотоприемника, параметр $i_{out(v_{FBG})}$ не известен. Если изменить $\Delta f = f_1 - f_2$ на некоторую величину $\Delta f'$, не меняя положения зондирующего излучения на центре спектральной характеристики, получим новые значения частот $f_3 = f_1 - \Delta f'$ и $f_4 = f_2 + \Delta f'$. Для частот f_3 и f_4 перепишем выражение (2) как

$$Q_{3,4} = \frac{v_{FBG}}{f_3 - f_4} \sqrt{\frac{i_{out(v_{FBG})}}{i_{3,4}} - 1}. \quad (3)$$

Поскольку $Q_{1,2} = Q_{3,4}$, путем совместного решения уравнений (2) и (3) получим $i_{out(v_{FBG})}$. Затем, подставляя это значение в любое из выражений, получим значение максимума огибающей спектра, на основании чего будет определена величина износа или количество ВБР. Можно заметить, что при

большем коэффициенте отражения, задача решается более информативно, хотя число решеток уменьшается.

Измерение величины износа может быть осуществлено либо по амплитудным характеристикам отраженного от решетки лазерного излучения, либо по спектральным характеристикам, для чего необходимо определить уширение спектра решетки на определенной зафиксированной величине. В первом случае погрешность измерения будет определяться величиной младшего разряда АЦП в системе регистрации. Во втором случае – эта величина будет определяться погрешностью интеррогатора. В обоих случаях достижимо измерение величины износа в десятые доли микрон.

Применение УВР для интеррогации разнотипных ВБР

Известно, что в УВР длина интегральных волноводов выбирается из условия кратности целому количеству значений m центральной длины волны $\lambda_{\text{УВР}}$, что можно отразить следующим образом:

$$\Delta L n_{\text{эфф}} = m \lambda_{\text{УВР}},$$

где ΔL – разность в физических длинах интегральных волноводов, $n_{\text{эфф}}$ – эффективный коэффициент преломления волновода.

Поскольку ΔL и $n_{\text{эфф}}$ зависят от температуры, то общая характеристика зависимости $\lambda_{\text{УВР}}$ от температуры будет выглядеть следующим образом:

$$\lambda_{\text{УВР}}(T) = \lambda_{\text{УВР}}(T_0) + \frac{\Delta T}{m} \cdot \frac{\partial(\Delta L n_{\text{эфф}})}{\partial T}, \quad (4)$$

где $\lambda_{\text{УВР}}(T)$ – центральная длина волны УВР при температуре T , $\lambda_{\text{УВР}}(T_0)$ – центральная длина волны УВР при температуре T_0 , ΔT – разность между температурами T и T_0 .

Для УВР на кремниевой подложке известна зависимость центральной длины волны от температуры:

$$\frac{1}{\Delta L} \cdot \frac{\partial(\Delta L n_{\text{эфф}})}{\partial T} = 1 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}. \quad (5)$$

Подставив (5) в (4) получим:

$$\lambda_{\text{УВР}}(T) = \lambda_{\text{УВР}}(T_0) + \frac{10^{-5} \Delta L}{m} \cdot \Delta T. \quad (6)$$

Выражение (6) показывает, что центральная длина волны УВР $\lambda_{\text{УВР}}$ монотонно изменяется с изменением температуры кремниевой подложки. Таким образом, зная температуру кремниевой подложки можно четко определить центральную длину волны УВР. Все сказанное выше в силу принципа работы УВР относится и к центральной длине волны каждого волноводного канала УВР, которые разнесены, например, на 0,8 или 1,6 нм в зависимости от полосы пропускания 100 или 200 ГГц.

Если в СПОС предусмотреть центральные длины волн ВРБ датчиков температуры, входящими в диапазон длин волн УВР или совпадающими с центральными длинами волн УВР при нормированных значениях температуры, можно, зная температурные зависимости $\lambda_{\text{УВР}}$, определить значения центральных длин волн ВРБ. Существенным является и тот факт, что при чувствительности ВРБ к температуре 10 пм/ $^\circ\text{C}$ [33], диапазон ухода центральной частоты составит 2 нм для диапазона измерения температуры от -100 до $+100$ $^\circ\text{C}$.

На рис. 6 показана структурная схема ветви СПОС для измерения температуры разнотипными ВРБ датчиками по положению их центральных длин волн относительно спектральных характеристик каналов УВР. На рис. 7 показано спектральное соотношение между характерными длинами волн УВР и ВРБ-датчиков. При изменении температуры спектр ВРБ смещается по длине волны. Учитывая известную нам температуру УВР, можно определить положение центральных длин волн ВРБ по корреляционному методу. Рассмотрим принцип работы метода [34, 35].

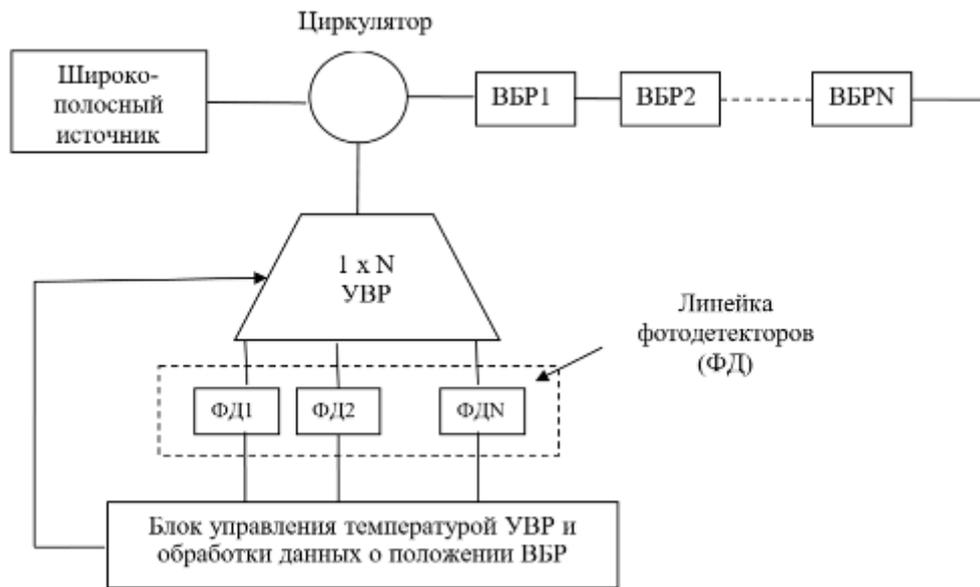


Рис. 6 – Структурная схема определения центральной длины волны ВБР

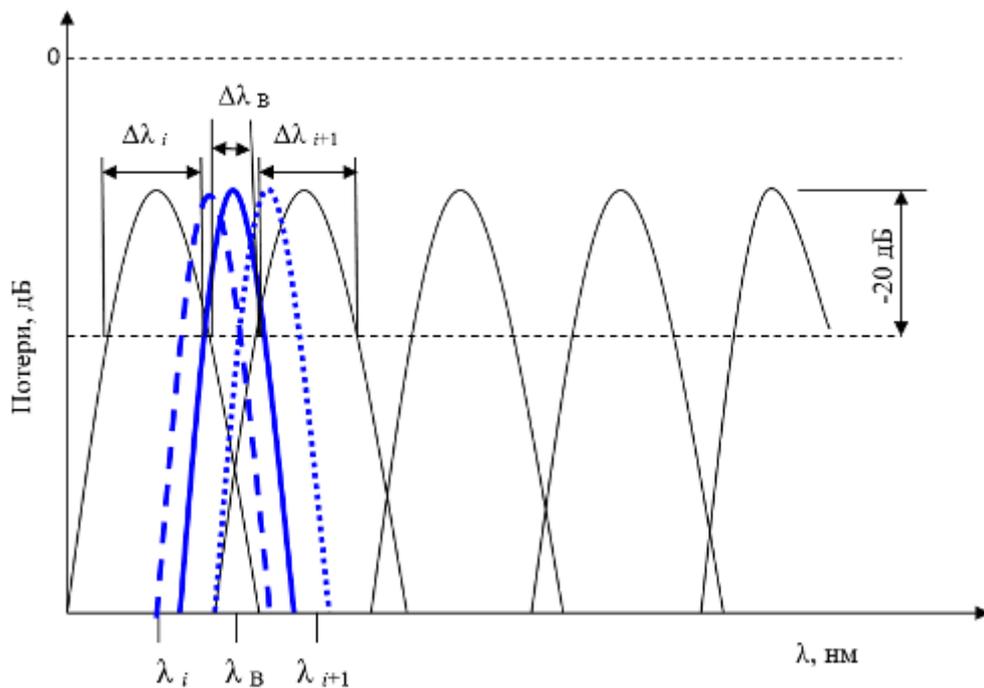


Рис. 7 – Спектр стандартной УВР и положение ВБР в начальной калиброванной точке измерений

Функция пропускания УВР для i -го канала гауссовой формы может быть записана следующим образом:

$$T_{УВР}(i, \lambda) = T_{УВРi} \exp \left[-4 \ln 2 \frac{(\lambda - \lambda_{УВРi})^2}{\Delta \lambda_{УВРi}^2} \right],$$

где $\lambda_{УВРi}$ – центральная длина волны, $\Delta\lambda_{УВРi}$ – ширина на полувысоте, $T_{УВРi}$ – максимальное пропускание i -го канала УВР.

Спектр отражения i -го ВБР-датчика гауссовой формы можно представить следующим образом:

$$R_{ВБР}(i, \lambda) = R_{ВБРi} \exp \left[-4 \ln 2 \frac{(\lambda - \lambda_{ВБРi})^2}{\Delta\lambda_{ВБРi}^2} \right],$$

где $\lambda_{ВБРi}$ – центральная длина волны, $\Delta\lambda_{ВБРi}$ – ширина на полувысоте, $R_{ВБРi}$ – максимальное отражение i -го ВБР-датчика.

Отраженный спектр излучения от i -го ВБР-датчика поступает в два канала УВР, i -ый и $(i+1)$ -ый, перекрываясь со спектрами указанных каналов. Обозначим мощность, поступающую на соответствующие i -ый и $(i+1)$ -ый фотоприемники (рис. 3.1), как P_i и P_{i+1} , представляющие свертку указанных спектров:

$$P_i = (1 - L_i) \int_0^{\infty} S(\lambda) R_{ВБР}(i, \lambda) T_{ВБР}(i, \lambda) d\lambda, \quad (7)$$

$$P_{i+1} = (1 - L_{i+1}) \int_0^{\infty} S(\lambda) R_{ВБР}(i, \lambda) T_{ВБР}(i+1, \lambda) d\lambda, \quad (8)$$

В выражениях (7) и (8) используются следующие обозначения: $S(\lambda)$ – спектр зондирующего источника излучения, в предположении, что его выходная мощность постоянна, L_i и L_{i+1} – коэффициенты ослабления в каждом из каналов. В случае если $L_i = L_{i+1}$ и $\Delta\lambda_{УВРi} = \Delta\lambda_{УВРi+1}$, получим отношение логарифмов мощностей каналов, как функцию соответствия между интенсивностью пропускания УВР и центральной длиной волны i -го ВБР-датчика:

$$10 \lg \left(\frac{P_{i+1}}{P_i} \right) = 10 \cdot \frac{\left(\frac{8(\ln 2)\Delta\lambda}{\Delta\lambda_{УВРi}^2 + \Delta\lambda_{ВБРi}^2} \lambda_{ВБРi}^2 + \frac{4(\ln 2)(\lambda_{УВРi+1}^2 - \lambda_{УВРi}^2)}{\Delta\lambda_{УВРi}^2 + \Delta\lambda_{ВБРi}^2} \right)}{\ln 10}, \quad (9)$$

где $\Delta\lambda$ – ширина спектра источника излучения.

Используя выражение (9) можно получить центральную длину волны $\lambda_{ВБРi}$ i -го ВБР-датчика. Начальное положение ВБР, показанное на рис. 7, определяет максимальную чувствительность измерений, при этом задействовано два канала УВР. Повысить эффективность измерений можно, задействовав большее число каналов. В этом случае требуется изготовление нестандартной УВР со структурой каналов, представленной на рис. 8. В этом случае число задействованных каналов равно пяти, а начальная центральная длина волны датчика совпадает с центральной длиной волны канала.

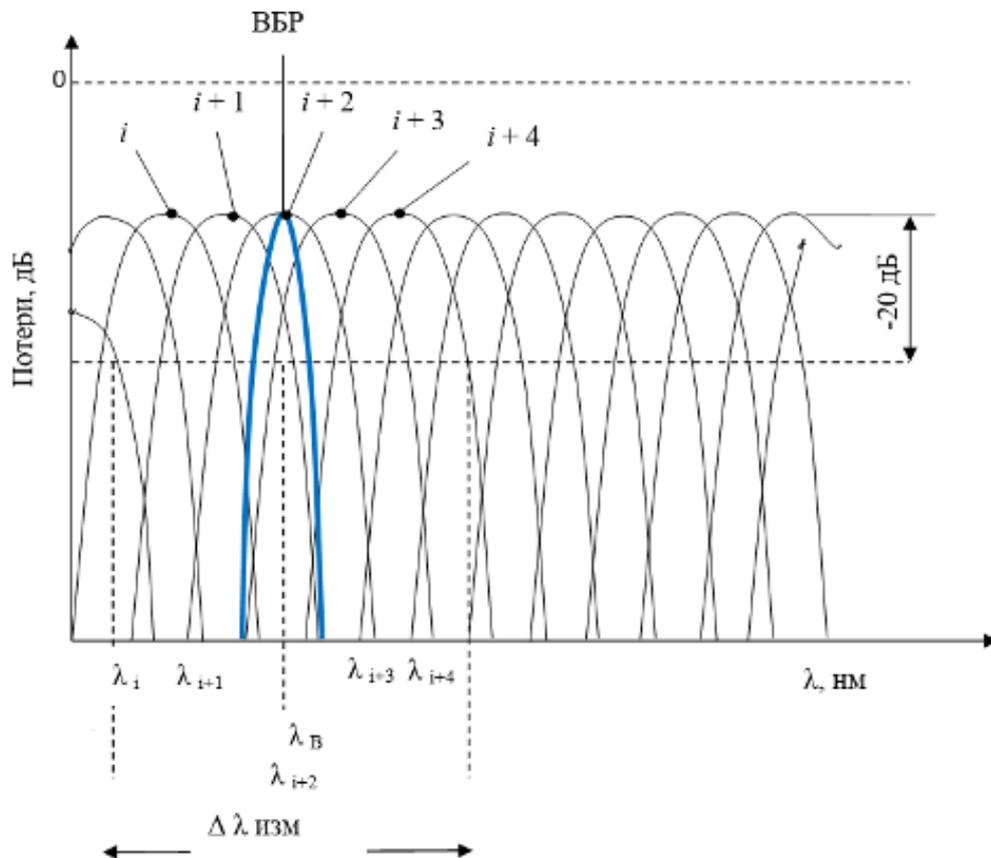


Рис. 8 – Спектр нестандартной УВР и положение ВБР в начальной калиброванной точке измерений

Второй путь повышения эффективности измерений – использование вместо широкополосного источника двухчастотного или полигармонического, настроенного таким образом, что частотные составляющие расположены спектрально в точках пересечения каналов по уровню – 20 дБ. В этом случае измерения проводятся по алгоритмам, представленным в [14, 21, 23].

Анализ рис. 7 и рис. 8 позволяет определить требования к ВБР, как датчикам СПОС по начальной центральной длине волны:

- при использовании стандартной УВР с шириной канала, например, 1,8 нм, для измерения температуры в диапазоне ± 80 °С необходимо выбирать начальные центральные длины волн ВБР в соответствии с рекомендациями ITU-T для сетки 200 ГГц, как среднее между центральными длинами волн двух соседних каналов;

- при использовании нестандартной УВР для тех же целей, необходимо выбирать начальные центральные длины волн ВБР в соответствии с паспортом УВР, как центральные длины волн соседних каналов.

Одним из путей развития данного узла СПОС может быть переход от использования УВР на использование комбгенератора, с частотами, установленными по точкам пересечения каналов. В этом случае система переходит на принципы определения центральной частоты ВБР, описанные в [10], что позволяет повысить чувствительность измерений, не смотря на существенное снижение уровня засветки решетки. Общая ширина полосы зондирующего источника остается прежней, однако он из широкополосного со сплошным спектром преобразуется в широкополосный с линейчатым спектром. Выигрыш в отношении сигнал шум объясняется обработкой сигнала по огибающей разностной частоты между двумя соседними каналами и существенно уменьшающейся в этом случае шумовой составляющей фотодетекторов ФД (рис. 6).

Заключение

В работе с позиций обобщения результатов разработки и практики применения впервые, по мнению автора, приведена идеология построения сенсорных ПОС, основанная на использовании концепции единого поля комплексированных ВОД и технологий телекоммуникационных ПОС второго поколения с гибридным временным и волновым мультиплексированием. За прототип структуры сенсорных сетей на основе телекоммуникационных ПОС, могут быть выбраны структуры встроенных в них систем мониторинга для контроля оптических характеристик используемых селективных элементов.

Впервые представлены требования к структуре, функциональному назначению, эксплуатационным, спектральным и метрологическим характеристикам сенсорных ПОС. Применение таких сетей позволит комплексно и оперативно решать задачи создания прозрачных, адаптивных и реконфигурируемых сетей.

Представлены примеры решения в сенсорных ПОС задач интеррогации однотипных ВБР с постоянным и изменяемым числом решеток в последовательности. Определены требования к унификации разнотипных ВБР для сенсорных ПОС по коэффициенту отражения и начальной центральной длине волны с учетом использования для их интеррогации стандартных и нестандартных УВР, обычно применяемых в слое подсистем распределения телекоммуникационных ПОС.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках проектной части государственного задания на выполнение НИР в КНИТУ-КАИ на 2014-2016 годы (программа «Радиофотоника», задание 3.1962.2014/К) и госконтракта №14.Z50.31.0023 в рамках Постановления Правительства РФ № 220 от 09.04.2010 г.

Литература

1. Sun Q., Li X., Zhang M. et al. High capacity fiber optic sensor networks using hybrid multiplexing techniques and their applications // Proc. of SPIE. 2011. V. 9044. P. 9044L.
2. Krebber K., Lenke P., Liehr S., Witt J., Schukar M. Smart technical textiles with integrated POF sensors // Proc. of SPIE. 2008. V. 6933. P. 69330V.
3. García I., Zubia J., Durana G. et al. Optical Fiber Sensors for Aircraft Structural Health Monitoring // Sensors. 2015. V. 15. pp. 15494-15519.
4. Куприянов В.Г., Степущенко О.А., Куревин В.В., Морозов О.Г., Садыков И.Р. Волоконно-оптические технологии в распределенных системах экологического мониторинга // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2011. Т. 13. № 4-4. С. 1087-1091.
5. Нуреев И.И. Радиофотонные амплитудно-фазовые методы интеррогации комплексированных датчиков на основе волоконных решеток Брэгга // Инженерный вестник Дона. 2016. №2. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n2y2016/3581.
6. Морозов О.Г., Нуреев И.И., Феофилактов С.В., Черепанов Д.А. Вопросы применения концепции программно-определяемых сетей для систем внутрискважинной волоконно-оптической телеметрии // Нелинейный мир. 2014. Т. 12. № 10. С. 83-90.
7. Kulchin Yu.N., Vitrik O.B., Dyshlyuk A.V. et al. Application of optical time-domain reflectometry for the interrogation of fiber Bragg sensors // Laser Physics. 2007. V. 17. No 11. pp. 1335-1339.
8. Kulchin Yu.N., Vitrik O.B., Dyshlyuk A.V. et al. Combined time-wavelength interrogation of fiber-Bragg gratings based on an optical time-domain reflectometry // Laser Physics. 2008. V. 18. No 11. pp. 1301–1304.

9. Kulchin Yu.N., Vitrik O.B., Dyshlyuk A.V. et al. Differential reflectometry of FBG sensors in the wide spectral range // Laser Physics. 2011. V. 21. No 2. pp. 304-307.

10. Морозов О.Г., Айбатов Д.Л., Садеев Т.С. Синтез двухчастотного излучения и его применения в волоконно-оптических системах распределенных и мультиплексированных измерений // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2010. Т. 13. № 3. С. 84-91.

11. Морозов О.Г., Айбатов Д.Л., Просвирин В.П. и др. Амплитудно-фазовые методы формирования зондирующих излучений для систем анализа волоконно-оптических структур // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2007. Т. 10. № 3. С. 119-124.

12. Морозов О.Г. Амплитудно-фазовое преобразование частоты в системах временной и частотной рефлектометрии волоконно-оптических информационных и измерительных сетей // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2004. Т. 7. № 1. С. 63-67.

13. Морозов О.Г., Ильин Г.И. Амплитудно-фазовая модуляция в системах радиофотоники // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2014. № 1 (20). С. 6-42.

14. Севастьянов А.А., Морозов О.Г., Талипов А.А. и др. Формирование многочастотного излучения в двухпортовом модуляторе Маха-Цендера // Научно-технический вестник Поволжья. 2013. № 4. С. 232-236.

15. Wang Y., Gong J., Dong B. et al. A large serial time-division multiplexed fiber Bragg grating sensor network // J. of Lightwave Tech. 2012. V. 30. No. 17. pp. 2751-2756.

16. Куревин В.В., Морозов О.Г., Просвирин В.П., Салихов А.М., Смирнов А.С. Структурная минимизация волоконно-оптических сенсорных

сетей экологического мониторинга // Инфокоммуникационные технологии. 2009. Т. 7. № 3. С. 46-52.

17. Морозов О.Г., Польский Ю.Е. Единое поле комплексированных ВОД в системах контроля параметров безопасности скоростных транспортных средств // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. 1997. № 4. С. 27-30.

18. Luo Y., Zhou X., Effenberger F. et al. Time- and wavelength-division multiplexed passive optical network (TWDM-PON) for next-generation PON stage 2 (NG-PON2) // J. of Lightwave Tech. 2013. V. 31. No. 4. pp. 587-593.

19. Childers B.A., Froggatt M.E., Allison S.G. et al. Use of 3000 Bragg grating strain sensors distributed on four eight-meter optical fibers during static load tests of a composite structure // Proc. of SPIE. 2001. V. 4332. pp. 133-142.

20. Алюшина С.Г., Денисенко П.Е., Морозов О.Г. и др. Волоконные решетки Брэгга с фазированной структурой в распределенных информационно-измерительных системах // Нелинейный мир. 2011. Т. 9. № 8. С. 522-528.

21. Алюшина С.Г., Морозов О.Г., Нуреев И.И. Полигармонические методы определения температуры на абонентских узлах пассивных оптических сетей // Научно-технический вестник Поволжья. 2014. № 2. С. 77-81.

22. Алюшина С.Г., Морозов О.Г. Мониторинг пассивных оптических сетей с использованием метода частотной рефлектометрии и двухчастотного зондирующего сигнала // Информационные технологии. Радиоэлектроника. Телекоммуникации. 2012. Т. 1. № 2. С. 26-34.

23. Алюшина С.Г., Морозов О.Г. Маломодовые методы частотной рефлектометрии для мониторинга PON // Фотон-экспресс. 2013. № 6 (110). С. 235-237.

24. Babin S.A., Kablukov S.I., Shelemba I.S., Vlasov A.A. An interrogator for a fiber Bragg sensor array based on a tunable erbium fiber laser // *Laser Physics*. 2007. V. 17. No 11. pp. 1340–1344.

25. Антонец И.В., Котов Л.Н., Шавров В.Г., Щеглов В.И. Метод исключения для расчета распространения волн через среды со ступенчатыми неоднородностями // *Журнал радиоэлектроники*. 2013. № 4. С. 1-38. URL: jre.cplire.ru/alt/apr13/9/text.pdf.

26. Морозов О.Г., Нуреев И.И., Сахабутдинов А.Ж. и др. Волоконно-оптические датчики износа и температуры трущихся поверхностей // *Фотон-экспресс*. 2015. № 6 (126). С. 210-211.

27. Кузнецов А.А. Комплексованный волоконно-оптический датчик износа и температуры трущихся поверхностей // *Научно-технический вестник Поволжья*. 2016. №1. С. 45-48.

28. Морозов О.Г., Артемьев В.И., Кузнецов А.А., Нуреев И.И. Щетка как интеллектуальный узел электродвигателя // *Инженерный вестник Дона*. 2016. №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2016/3525.

29. Морозов О.Г., Нуреев И.И., Сахабутдинов А.Ж. и др. Устройство для измерения величины износа и температуры изделия при трении // Патент РФ №150177. 2015. Бюл. № 4.

30. Морозов О.Г., Нуреев И.И., Сахабутдинов А.Ж. и др. Устройство для измерения величины износа и температуры изделия при трении // Патент РФ №2557577. 2015. Бюл. № 21.

31. Wang Y., Gong J., Wang D.Y. et al. A quasi-distributed sensing network with time-division multiplexed fiber Bragg gratings // *IEEE Photon. Technol. Lett.* 2011. V. 23. No 1. pp. 70–72.

32. Морозов О.Г., Насыбуллин А.Р., Веденькин Д.А. и др. Двухчастотный метод определения параметров резонансных датчиков СВЧ-диапазона // *Вестник Поволжского государственного технологического*

университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2014. № 1 (20). С. 76-86.

33. Vasil'ev S.A. et al. Fibre gratings and their applications //Quantum Electronics. 2005. V. 35. No 12. pp. 1085-1103.

34. Willshire A. J., Dziuda L. and McDonald J. R. Performance analysis of the fiber Bragg grating interrogation system based on an arrayed waveguide grating // IEEE T. Instrum. Meas. 2004. V. 53. pp. 1192–1196.

35. Li H., Zhou W., Liu Y. et al. Preliminary investigation of an SOI-based arrayed waveguide grating demodulation integration microsystem // Sci. Rep. 2014. V. 4. No. 4848. pp. 1-6.

References

1. Sun Q., Li X., Zhang M. et al. Proc. of SPIE. 2011. V. 9044. P. 9044L.
2. Krebber K., Lenke P., Liehr S., Witt J., Schukar M. Proc. of SPIE. 2008. V. 6933. P. 69330V.
3. García I., Zubia J., Durana G. et al. Sensors. 2015. V. 15. pp. 15494-15519.
4. Kuprijanov V.G., Stepushhenko O.A., Kurevin V.V., Morozov O.G., Sadykov I.R. Izvestija Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk. 2011. V. 13. № 4-4. pp. 1087-1091.
5. Nureev I.I. Inzhenernyj vestnik Dona. 2016. №2. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n2y2016/3581.
6. Morozov O.G., Nureev I.I., Feofilaktov S.V., Cherepanov D.A. Nelinejnyj mir. 2014. V. 12. № 10. pp. 83-90.
7. Kulchin Yu.N., Vitrik O.B., Dyshlyuk A.V. et al. Laser Physics. 2007. V. 17. No 11. pp. 1335-1339.
8. Kulchin Yu.N., Vitrik O.B., Dyshlyuk A.V. et al. Laser Physics. 2008. V. 18. No 11. pp. 1301–1304.



9. Kulchin Yu.N., Vitrik O.B., Dyshlyuk A.V. et al. Laser Physics. 2011. V. 21. No 2. pp. 304-307.
 10. Morozov O.G., Ajbatov D.L., Sadeev T.S. Fizika volnovykh processov i radiotekhnicheskie sistemy. 2010. V. 13. № 3. pp. 84-91.
 11. Morozov O.G., Ajbatov D.L., Prosvirin V.P. i dr. Fizika volnovykh processov i radiotekhnicheskie sistemy. 2007. V. 10. № 3. pp. 119-124.
 12. Morozov O.G. Fizika volnovykh processov i radiotekhnicheskie sistemy. 2004. V. 7. № 1. pp. 63-67.
 13. Morozov O.G., Il'in G.I. Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tehnologicheskogo universiteta. Seriya: Radiotekhnicheskie i infokommunikacionnye sistemy. 2014. № 1 (20). pp. 6-42.
 14. Sevast'janov A.A., Morozov O.G., Talipov A.A. i dr. Nauchno-tehnicheskij vestnik Povolzh'ja. 2013. № 4. pp. 232-236.
 15. Wang Y., Gong J., Dong B. et al. J. of Lightwave Tech. 2012. V. 30. No. 17. pp. 2751-2756.
 16. Kurevin V.V., Morozov O.G., Prosvirin V.P., Salihov A.M., Smirnov A.S. Infokommunikacionnye tehnologii. 2009. V. 7. № 3. pp. 46-52.
 17. Morozov O.G., Pol'skij Ju.E. Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta im. A.N. Tupoleva. 1997. № 4. pp. 27-30.
 18. Luo Y., Zhou X., Effenberger F. et al. J. of Lightwave Tech. 2013. V. 31. No. 4. pp. 587-593.
 19. Childers B.A., Froggatt M.E., Allison S.G. et al. Proc. of SPIE. 2001. V. 4332. pp. 133-142.
 20. Aljushina S.G., Denisenko P.E., Morozov O.G. i dr. Nelinejnyj mir. 2011. V. 9. № 8. pp. 522-528.
 21. Aljushina S.G., Morozov O.G., Nureev I.I. Nauchno-tehnicheskij vestnik Povolzh'ja. 2014. № 2. pp. 77-81.
-



22. Aljushina S.G., Morozov O.G. Informacionnye tehnologii. Radioelektronika. Telekommunikacii. 2012. V. 1. № 2. pp. 26-34.
 23. Aljushina S.G., Morozov O.G. Foton-jekspress. 2013. № 6 (110). pp. 235-237.
 24. Babin S.A., Kablukov S.I., Shelemba I.S., Vlasov A.A. Laser Physics. 2007. V. 17. No 11. pp. 1340–1344.
 25. Antonec I.V., Kotov L.N., Shavrov V.G., Shheglov V.I. Zhurnal radioelektroniki. 2013. № 4. pp. 1-38. URL: jre.cplire.ru/alt/apr13/9/text.pdf.
 26. Morozov O.G., Nureev I.I., Sahabutdinov A.Zh. i dr. Foton-jekspress. 2015. № 6 (126). pp. 210-211.
 27. Kuznecov A.A. Nauchno-tehnicheskij vestnik Povolzh'ja. 2016. №1. pp. 45-48.
 28. Morozov O.G., Artem'ev V.I., Kuznecov A.A., Nureev I.I. Inzhenernyj vestnik Dona. 2016. №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2016/3525.
 29. Morozov O.G., Nureev I.I., Sahabutdinov A.Zh. i dr. Patent RF №150177. 2015. Bjul. № 4.
 30. Morozov O.G., Nureev I.I., Sahabutdinov A.Zh. i dr. Patent RF №2557577. 2015. Bjul. № 21.
 31. Wang Y., Gong J., Wang D.Y. et al. IEEE Photon. Technol. Lett. 2011. V. 23. No 1. pp. 70–72.
 32. Morozov O.G., Nasybullin A.R., Veden'kin D.A. i dr. Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tehnologicheskogo universiteta. Serija: Radiotehnicheskie i infokommunikacionnye sistemy. 2014. № 1 (20). pp. 76-86.
 33. Vasil'ev S.A. et al. Quantum Electronics. 2005. V. 35. No 12. pp. 1085-1103.
 34. Willshire A. J., Dziuda L. and McDonald J. R. IEEE T. Instrum. Meas. 2004. V. 53. pp. 1192–1196.
 35. Li H., Zhou W., Liu Y. et al. Sci. Rep. 2014. V. 4. No. 4848. pp. 1-6.
-