

УДК 621.383

И.И. Нуреев

Казанский национальный исследовательский
технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ, Казань, Россия

**РАДИОФОТОННЫЕ ПОЛИГАРМОНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ
ИНТЕРРОГАЦИИ КОМПЛЕКСИРОВАННЫХ ДАТЧИКОВ
НА ОСНОВЕ ВОЛОКОННЫХ БРЭГГОВСКИХ РЕШЕТОК.
ЧАСТЬ 1. РАДИОФОТОННЫЕ ПОЛИГАРМОНИЧЕСКИЕ
МЕТОДЫ ЗОНДИРОВАНИЯ**

Рассмотрены вопросы разработки принципов построения радиофотонных полигармонических систем интеррогации комплексированных датчиков на основе волоконных брэгговских решеток (ВБР). Рассмотрена проблемная область современных волоконно-оптических сенсорных сетей, в частности ограничения систем интеррогации ВБР. В результате проведенного анализа обоснована необходимость и оценены преимущества их построения на основе радиофотонных и полигармонических методов зондирования. Показано, что разработанные системы характеризуются повышенной скоростью опроса датчиков, возможностью эффективного восстановления контура ВБР по результатам фиксированного зондирования без сканирования, а также сохранением преимуществ по чувствительности и точности измерений, присущих симметричным двухчастотным рефлектометрическим системам с обработкой информации об измерительном преобразовании по параметрам огибающей биений двух частотных компонентов зондирующего излучения.

Ключевые слова: волоконно-оптическая сенсорная сеть, интеррогатор, волоконная брэгговская решетка, полигармоническое симметричное зондирование, радиофотоника.

I.I. Nureev

Kazan National Research Technical University
named after A.N. Tupolev – KAI, Kazan, Russian Federation

**MICROWAVE PHOTONIC POLYHARMONIC SYSTEMS
FOR INTERROGATION OF COMPLEX SENSORS, BASED
ON FIBER BRAGG GRATINGS.
PART 1. METHODS OF MICROWAVE PHOTONIC
POLYHARMONIC PROBING**

The article, consisting of three parts, will discuss the issues of design principles development for microwave photonic polyharmonic systems for interrogation of complex sensors, based on fiber Bragg gratings. In the first part, the problems area of modern fiber-optic sensor networks and, in particular, limitations of FBG interrogation systems are considered. Carried out analysis allowed to prove the necessity and

Статья подготовлена по материалам доклада на конференции «Оптическая рефлектометрия – 2016».

evaluate benefits of their structure future, based on microwave photonic and polyharmonic probing. It is shown that the developed systems are characterized by an increased rate of sensors interrogation and the ability to efficiently recover FBG contour as a result of the fixed probing without scanning. Additionally systems preserve the advantages in sensitivity and measurement accuracy inherent to symmetrical two-frequency reflectometric systems with the processing of information about the measuring transformation in the parameters of the envelope of beats between two-frequency probing radiation components.

Keywords: fiber-optic sensor net, interrogator, fiber Bragg grating, polyharmonic symmetrical probing, microwave photonics.

Введение

В решении ряда важнейших социальных и научно-технических проблем мирового развития радиофотоника играет одну из главных ролей [1, 2]. Эффективность радиофотонных методов определяется, с одной стороны, широкой полосой, высокой скоростью, эффективностью и помехозащищенностью обработки радиочастотных сигналов в оптическом диапазоне, а с другой – возможностью линейного или нелинейного преобразования комплексного спектра изменяющихся параметров оптического поля в радиочастотное электрическое. Наглядным примером радиофотонных систем первого класса являются телекоммуникационные волоконно-оптические системы, системы «радио-по-волокну» и др., в которых на оптической несущей передаются, обрабатываются и принимаются цифровые и аналоговые информационные сигналы в полосе частот 10, 40, а теперь уже и 100 ГГц. К радиофотонным системам второго класса следует отнести волоконно-оптические информационно-измерительные системы: векторные и скалярные анализаторы оптических сетей, бриллюэновские рефлектометры, СВЧ-спектрометры и т.д.

Ключевым элементом систем радиофотоники, определяющим качественно их преимущества, а количественно метрологические характеристики, является подсистема формирования модулированного лазерного излучения, обеспечивающая как перенос радиосигнала в оптический диапазон (например, с целью передачи информации в телекоммуникационных системах), так и формирование полигармонического оптического сигнала с разностными частотами, лежащими в радиодиапазоне (например, для генерации зондирующих излучений в информационно-измерительных системах) [3, 4]. При этом, как правило, используются не дорогостоящие и сложные широкополосные или сканирующие в широком диапазоне лазеры либо отдельный набор лазеров, а более простые и дешевые одномодовые лазеры с внутренней модуляцией или синхронизацией мод либо односторонние лазеры с внешней модуляцией на ос-

нове электрооптических модуляторов с рабочим диапазоном частот до 100 ГГц амплитудного, фазового, амплитудно-фазового и поляризационного типов.

С развитием телекоммуникационных и информационно-измерительных систем неразрывно связаны развитие техники сенсорных волоконно-оптических систем и применение в них волоконно-оптических датчиков (ВОД), строящихся на базе волоконных брэгговских решеток и структур (ВБС), в частности гауссовских и чирпированных ВБР, ВБР с фазовым π -сдвигом, структур типа интерферометр Фабри–Перо (ИФП) на базе двух ВБР и т.д. ВБР, в свою очередь, является ключевым элементом указанных выше систем.

Однако радиофотонные методы интеррогации данного типа ВОД не нашли широкого применения в сенсорных системах, что объясняется устоявшимся в них подходом к использованию полностью оптических спектральных технологий опроса датчиков с широкополосными лазерами и высокой стоимостью создания и использования известного сканирующего радиофотонного измерительного оборудования [5].

В трех частях статьи, две из которых опубликованы в данном номере журнала, третью планируется издать в следующем, предпринята попытка раскрыть основные проблемы области развития радиофотонных полигармонических систем интеррогации комплексированных ВОД, построенных на основе ВБР, и найти их общее или частные решения.

В данной части статьи рассмотрены проблемы современных волоконно-оптических сенсорных сетей, ограничения систем интеррогации ВБР, обоснованы преимущества их построения на основе радиофотонных и полигармонических методов зондирования.

Во второй части будут развиты положения единого поля комплексированных ВОД с включением в него однотипных ВБР, объединенных в группу, определены требования к системам интеррогации последних, представлены принципы синтеза одиночных ВБР со специальной формой спектра для линеаризации характеристик измерительного преобразования, а также будут приведены основные принципы их калибровки в случае комплексированных измерений.

В третьей части будут определены требования к построению нового класса радиофотонных систем – полигармонических систем интеррогации комплексированных ВОД, описаны преимущества их использования в системах охраны периметра, систем климатических испытаний, мониторинга пассивных оптических сетей связи, контроля

параметров электрических двигателей и машин, а также в приложениях для смежных областей науки и техники (например, аналитической спектроскопии газов, лидарных измерениях и т.д.).

1. Проблемная область волоконно-оптических сенсорных систем, построенных на основе волоконных брэгговских решеток

Современные технологии позволяют создавать различные типы ВБР и ВБС в оптическом волокне и пространственно-разнесенные сенсорные сети на их основе, применяемые в системах структурного мониторинга инженерных сооружений, охраны периметра, решения экологических задач, внутрискважинной телеметрии, бортовых системах контроля параметров скоростных транспортных средств и т.д. Благодаря преимуществам ВБР и ВБС, таким как малый размер и вес, невосприимчивость к электромагнитным полям, простота мультиплексирования, определенным природой волокна, они лежат в основе измерения температуры, механических деформаций, коэффициента преломления как отдельно, так и комплексированно в силу мультипликативности брэгговского отклика. В 2016 г. рост рынка применения ВОД преимущественно на основе ВБР может достичь 3,36 млн установленных датчиков. К 2020 г. данный рынок может вырасти в 1,5–2 раза [6].

Классически ВОД можно разделить на три большие группы: точечные, квазираспределенные и распределенные. Точечные ВОД на основе ВБР или их квазираспределенные последовательности условно представляют собой устройства с прямым кодированием «длина волны – измеряемая величина» и, как правило, преобразуют в измеряемую величину сдвиг центральной длины волны спектрального резонансного отклика решетки либо некоторой спектральной узкополосной особенности в нем. При этом методы интеррогации распределенных ВОД несильно отличаются от предложенных для ВБР, поскольку имеют схожую с решетками природу информативного контура, а именно сверхузкополосные контуры усиления или поглощения, вызванные вынужденным рассеянием Мандельштама–Бриллюэна, или сверхширокополосные контуры стоксовой и антистоксовой составляющих, вызванные вынужденным комбинационным рассеянием Рамана. В связи с этим объединение всех трех групп ВОД в единую сенсорную сеть представляется вполне обоснованным и перспективным [7–9].

Интеррогаторы – приборы, с помощью которых опрашиваются ВБС, – строятся, как правило, на основе сложных дорогостоящих оптико-электронных устройств: оптических анализаторов спектра (ОАС), сканирующих или комбинированных пространственных оптических фильтров (КПОФ) с ПЗС, оптического узкополосного фильтра (ОУФ) с зависящей от длины волны спектральной характеристикой склона [10, 11]. В последнее время развиваются более простые и дешевые методы, основанные на оптической рефлектометрии во временной (OTDR) и частотной (OFDR) областях. Равновероятность применения последних требует использования в сенсорных сетях технологий как временного, так и частотного (или волнового) мультиплексирования. Однако сравнительный анализ результатов, полученных в ряде работ при эксплуатации широкополосных импульсных OTDR- и непрерывных сканирующих OFDR-интеррогаторов, позволил определить лишь узкие области, в которых данные системы отдельно применимы. Для первых это системы мониторинга протяженных инженерных сооружений, для вторых – системы мониторинга коротких оптических сетей и устройств (например, фотонных модулей), что связано в основном с характеристиками зондирующих излучений, используемых для измерений.

Компромисс может быть найден при использовании узкополосных непрерывных симметричных двухчастотных рефлектометрических систем (СДРС), развиваемых в Казанском национальном исследовательском техническом университете – КАИ (КНИТУ – КАИ) и предложенных в 2004 г. профессором О.Г. Морозовым, как систем оптической рефлектометрии в двухчастотной области (OTFDR), которые охватывают широкий класс различных по назначению информационно-измерительных открытых и волоконно-оптических сенсорных систем [12].

Существенным различием между широкополосными и узкополосными методами является обработка измерительной информации. Вышеуказанные термины означают, что для определения центральной длины волны ВБР и в двух первых, и в третьем случаях достаточно двух частотных составляющих: межмодовых в зондирующем импульсе, одной опорной и второй измерительной при частотных сканирующих измерениях, или симметричных, специально синтезированных с помощью метода амплитудно-фазового преобразования Ильина–Морозова [13–15], при непрерывном зондировании без сканирования. Однако, если в первом случае обработка ведется путем сравнения спектрально выделяемых амплитуд или определения суммарной энер-

гетики двух составляющих в области постоянного тока, во втором – путем сравнения амплитуд составляющих, получаемых при сканировании в широкой полосе частот, то в третьем – анализируются параметры огибающей биений между двумя жестко связанными по фазе и исходно равными по амплитуде составляющими на их разностной частоте, как правило, известной, фиксированной и выделяемой узкополосным фильтром в области минимальных шумов фотоприемника.

Во всех случаях разностная частота составляющих лежит в одинаковых пределах (единиц-десятков гигагерц) и определяется параметрами зондирующих излучений и зондируемых ВБР. Эта общность позволяет отнести указанные методы, в том числе и первый, в случае перехода на анализ по межмодовой частоте к радиофотонным. В последнее время появились радиофотонные методы интеррогации, основанные на включении ВБР в цепь обратной связи оптико-электронного автогенератора и измерении генерируемой радиочастоты как информативного параметра измерительного преобразования комплексированного типа. Однако с определенной осторожностью можно утверждать, что СДРС, в которых зондирующие частоты априори известны, будут находить все более широкое применение при условии их быстрого и качественного развития.

Для этого необходимо значительно упростить методику преобразования частоты для получения зондирующего излучения, повысить чистоту, стабильность его спектральных характеристик и, главное, количество составляющих.

В импульсе таких составляющих по спектру множество, и зондирование ВБР с различными длинами волн или в диапазоне изменения характеристик не требует сканирования или перестройки излучения, как в частотных, а в двухчастотном излучении – всего две, что определяет необходимость применения комб-генераторов и формирования методов для полигармонического зондирования ВБР в широком диапазоне. В противном случае требуется создание более жестких условий для разнообразия спектральных характеристик ВБС – применения однотипных ВБР, настроенных на одну длину волны, с относительно невысоким коэффициентом отражения (от -20 до -40 дБ).

Последнее требование, с одной стороны, выглядит как ограничение, а с другой – позволяет придать некоторую универсальность сенсорным сетям. Дополнительным фактором, позволяющим решить вопрос в пользу последнего заключения, является широкое использование в волоконно-оптических телекоммуникационных сетях мульти-

плексоров 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, в силу чего УВР могут быть использованы в качестве интеррогаторов.

Отмеченные выше обстоятельства определяют актуальность научно-технической проблемы улучшения метрологических и технико-экономических характеристик, а также расширения функциональных возможностей радиофотонных систем интеррогации комплексированных ВОД, построенных на основе ВБР различных типов.

Приведенные аргументы и требования к построению современных сенсорных волоконно-оптических систем однозначно указывают на необходимость рассмотрения возможности их создания на основе радиофотонных методов интеррогации комплексированных ВОД и принципов построения СДРС с развитием до уровня симметричных полигармонических систем. Радиофотонные полигармонические системы интеррогации комплексированных ВОД должны базироваться на развитии:

- амплитудно-фазового способа преобразования одночастотного когерентного излучения в двухчастотное до уровня формирования полигармонических зондирующих излучений;

- концепции единого поля комплексированных ВОД до уровня возможности применения однотипных ВБР, объединенных в группы, с целью минимизации структуры системы и упрощения возможности получения с одной ВБР измерительной информации о нескольких физических полях одновременно;

- измерительных подходов для интеррогации как точечных и квазираспределенных, так и распределенных ВОД и принципов построения телекоммуникационных систем с гибридным временным и волновым уплотнением для расширения функциональных возможностей систем интеррогации и универсализации волоконно-оптических сенсорных систем.

Решение указанных задач и стало основным направлением проведенных исследований, результаты которых нашли отражение в данной части статьи.

Во втором разделе приведена оценка преимуществ радиофотонных методов интеррогации ВБР, в третьем показаны информационные преимущества полигармонических методов их зондирования. В заключении кратко представлены полученные результаты.

2. Оценка преимуществ радиотонных методов интеррогации волоконных брэгговских решеток

В настоящем разделе рассмотрен ряд ограничений, сдерживающих темпы развития радиотонных систем интеррогации ВОД, построенных на основе ВБР.

В современных сенсорных системах для преобразования информации с ВБР используется широкополосная, или перестраиваемая в широком диапазоне, оптико-электронная измерительная аппаратура – интеррогаторы: ОАС, перестраиваемые лазеры, оптические рефлектометры в OTDR- и OFDR-областях, сканирующие фильтры Фабри–Перо (СФФП), а также дифракционные решетки КПОФ с ПЗС-матрицами, ОУФ, АУФ и др.

Подробная информация о характеристиках интеррогаторов представлена в таблице.

Сравнительные характеристики интеррогаторов

№ п/п	Метод интеррогации		Применение	Скорость опроса, МГц	Разрешение, пм	
1	Оптико-электронный	ОАС, СФФП (механический привод)	Частотный	Статические деформации, температура	10^{-6}	1–10
2		СФФП (электронный привод)		Вибрации, динамические деформации	10^{-4}	1–5
3		КПФ	Амплитудный	Ускорение	10^{-3}	1–5
4	ОУФ	Акустика		1	1–10	
5	Радиотонный	Преобразование «частота – время»	Частотный	Деформации + температура	5	0,25
6		ОЭАГ		Изгиб + температура	10	0,3–0,4
7		Контроль длины ВБР	Амплитудно-фазовый	Износ + температура + ...	50	0,1
8		Контроль длины волны ВБР с вытравленного и невытравленного участков волокна		Показатель преломления + температура	50	0,1
9		Контроль ширины окна прозрачности чирпированной ВБР с фазовым сдвигом		Изгиб + температура	50	0,1

Как видно из таблицы, оптико-электронные интеррогаторы характеризуются рядом ограничений.

Первое из них – малая скорость опроса, необходимая для получения высокого разрешения измерений по длине волны. При использовании ОАС или СФФП высокое разрешение по длине волны (1–10 пм) требует большего времени для механического сканирования спектрального диапазона ВБР, что обуславливает низкую скорость интеррогации (до 1 Гц). При использовании электронного сканирования в СФФП (разрешение до 1–5 пм) скорость интеррогации достигает 100 Гц. Применение КПФ- и ПЗС-матриц с высокой скоростью опроса обеспечивает скорость сканирования, равную 1 кГц, при разрешении 1–5 пм. Использование ОУФ позволяет увеличить скорость интеррогации до 1 МГц, но ограничивает разрешение по длине волны (1–10 пм).

Вторым ограничением оптико-электронных интеррогаторов является невозможность измерения нескольких величин одновременно с одной ВБР. Волоконные брэгговские решетки комплексированы по природе и способны измерять широкий спектр параметров, таких как натяжение, давление, вибрации, тепловые деформации, характеристики окружающей среды, что основано на мультипликативной чувствительности решеток к механическому напряжению, температуре, а в некоторых случаях к показателю преломления окружающей волокно среды. С одной стороны, это является существенным недостатком систем измерения на базе ВБР, с другой – показывает, что ВБР имеют потенциал для одновременного измерения до трех параметров. Сложность одновременного различения и измерения нескольких целевых величин объясняется тем, что большинство измеряемых величин могут привести к одинаковому сдвигу длины волны ВБР. Следовательно, дополнительные меры должны быть приняты для разделения различных измеряемых величин, что также скажется на скорости опроса ВОД. Кроме того, наличие, например, второй ВБР [16], которая может быть использована как опорная, чтобы дополнительно к температуре получить информацию о деформации, существенно повышает сложность системы. В связи с этим для широкого практического внедрения ВОД на основе ВБР желательно, чтобы одиночная решетка использовалась для выполнения измерений нескольких величин одновременно с высоким разрешением и скоростью интеррогации, что может быть достигнуто с помощью применения радиофотонных методов.

В-третьих, следует учесть, что спектральные характеристики ВБР носят резонансный или близкий к нему характер, однако функция пре-

образования «длина волны – амплитуда» для их оценки в области резонанса либо осциллирует, либо имеет достаточно плоский характер. Таким образом, для повышения разрешающей способности измерений ищут естественные узкополосные неоднородности в спектре ВБР или синтезируют ВБР с неоднородностями в структуре. В последнее время в структуре ВОД начинают активно применяться ВБР с неоднородностью в виде дискретного фазового π -сдвига в законе модуляции коэффициента преломления решетки. Однако подобные методы не всегда позволяют достичь желаемого результата, а иногда приводят и к существенному удорожанию интеррогаторов, поэтому зачастую используют математические методы аппроксимации резонансных характеристик ВБР, чтобы с определенной вероятностью определить ее центральную длину волны.

В работах [5, 17–19] рассматриваются три комплексированных ВБР-датчика с улучшенным разрешением и скоростью интеррогации, созданные на основе технологий радиофотоники.

Первый датчик основан на формировании спектрального и частотно-однозначного отображения сдвига длины волны по положению корреляционного пика ЛЧМ-радиосигнала. Данная методика широко используется в современных радиолокационных системах для увеличения разрешающей способности измерений. Скорость интеррогации измеряется в мегагерцах. Если используется волокно с высоким коэффициентом двулучепреломления, по различным поляризационным составляющим могут быть измерены как деформация, так и температура [17].

Во втором датчике используется перестраиваемый оптико-электронный автогенератор (ОЭАГ) [18] на основе ВБР с фазовым сдвигом. В ОЭАГ фазовый модулятор и ВБР с фазовым сдвигом образуют оптический полосовой радиофотонный фильтр (ОПРФ). Центральная частота ОПРФ изменяется при приложении деформации к ВБР с фазовым сдвигом, что приводит к частотному сдвигу в сгенерированном радиосигнале. Скорость интеррогации в данном случае измеряется в мегагерцах. Разрешение определяется межмодовым интервалом ОЭАГ (0,1–0,5 пм).

В третьем варианте используется стабильный по температуре датчик для измерения поперечной нагрузки на основе перестраиваемого двухчастотного ОЭАГ [19]. Вместо использования ВБР с фазовым сдвигом в одномодовом волокне используется ВБР с фазовым сдвигом в волокне, поддерживающем поляризацию. Поскольку два частотных компонента ОЭАГ имеют одинаковый частотный сдвиг, индуцированный тем-

пературой, то частота биений между указанными компонентами чувствительна только к поперечной нагрузке. Скорость интеррогации составляет десятки мегагерц и позволяет системе работать на сверхвысокой скорости.

Таким образом, в работах [5, 17–19] описаны три варианта ВОД на основе ВБР, основным принципом измерительного преобразования которых является «оптическая длина волны – частота радиосигнала – измеряемая величина». При этом в первом варианте вводится дополнительное преобразование «частота – время», что снижает скорость опроса до единиц мегагерц (см. таблицу). Во втором и третьем вариантах необходимо использование векторного анализатора цепей для поиска неизвестной информационной частоты ОЭАГ, определяющей измеряемую величину, что ограничивает скорость опроса 10 МГц.

Для устранения указанных ограничений нами предложена методика интеррогации, основанная на принципе измерительного преобразования «оптическая длина волны – амплитуда и фаза радиосигнала – измеряемая величина». ВОД на основе ВБР зондируется как минимум двухчастотным, а в некоторых случаях четырехчастотным, зондирующим излучением с известной средней и разностными частотами между компонентами [13–15, 20–22]. Данный принцип близок к третьему варианту датчика, рассмотренному в работе [19], однако в нашем случае процедура поиска неизвестной частоты радиосигнала как функции измеряемой величины исключается из процесса измерения, что позволяет повысить скорость опроса интеррогатора до 10–50 МГц (см. таблицу). Исключается также процедура поиска максимального сигнала в области центральной длины ВБР, которая, как правило, «изрезана», что дает возможность повысить точность и разрешение измерений. Цифровой последетекторной обработке подвергаются коэффициент амплитудной модуляции радиосигнала биений, определяющий значение измеряемой величины, и/или разность фаз огибающих радиосигнала биений до входа в датчик и на его прямом, или рефлектометрическом, выходе, определяющая направление сдвига длины волны. По данным принципам нами были построены системы интеррогации для датчиков измерения износа и температуры щеток электрических двигателей¹ [23–25], датчиков измерения

¹ Устройство для измерения величины износа и температуры изделия при трении: пат. № 150177 Рос. Федерация / О.Г. Морозов, И.И. Нуреев, А.Ж. Сахабутдинов [и др.]. Опубл. 10.02.2015. Бюл. № 4; Устройство для измерения величины износа и температуры изделия при трении: пат. № 2557577 Рос. Федерация / О.Г. Морозов, И.И. Нуреев, А.Ж. Сахабутдинов [и др.]. Опубл. 27.07.2015. Бюл. № 21.

показателя преломления и температуры жидкостей [26–28], стабильных по температуре датчиков изгибного натяжения [29, 30], давления и температуры для внутрискважинных измерений [31, 32].

Таким образом, для создания современных волоконно-оптических сенсорных систем необходимо построение радиофотонных интеррогаторов комплексированных ВОД с высокими разрешением и скоростью опроса, использующих методы опроса и адаптированные к ним датчики с возможностью одновременного измерения нескольких физических величин. Предложенные радиофотонные методы интеррогации, использующие перенос измеряемой информации в радиочастотную область, позволяют повысить скорость опроса и разрешающую способность измерений, используя при этом преимущества полигармонического зондирования датчиков для проведения измерений на радиочастоте огибающей биений между двумя или несколькими составляющими зондирующего излучения [33–37].

Скорость опроса может быть увеличена до десятков мегагерц, разрешающая способность – до единиц герц. Мультипликативность измерений может быть достигнута за счет применения ВБР со специальной формой спектра (асимметричной треугольной, chirпированной с фазовым π -сдвигом, трапецеидальной и т.д.) и их зондирования симметричными по спектру или с различными разностными частотами полигармоническими излучениями на разных участках спектра ВБР.

3. Информационные преимущества полигармонических методов зондирования волоконных брэгговских решеток

Рассмотрим двухчастотное зондирование ВБР-профиля. Сигнал биений двух частотных составляющих, отраженных от или прошедших через ВБР, на выходе фотоприемника описывается уравнением

$$F(t) = [A_1 \sin(\omega_1 t + \varphi_1) + A_2 \sin(\omega_2 t + \varphi_2)]^2, \quad (1)$$

где ω_1 – частота первой составляющей зондирующего излучения, $\omega_1 = (\omega - \Delta\varepsilon / 2)$; ω_2 – частота второй составляющей зондирующего излучения, $\omega_2 = (\omega + \Delta\varepsilon / 2)$; φ_1 и φ_2 – их начальные фазы.

На рис. 1 изображена ситуация двухчастотного зондирования контура ВБР.

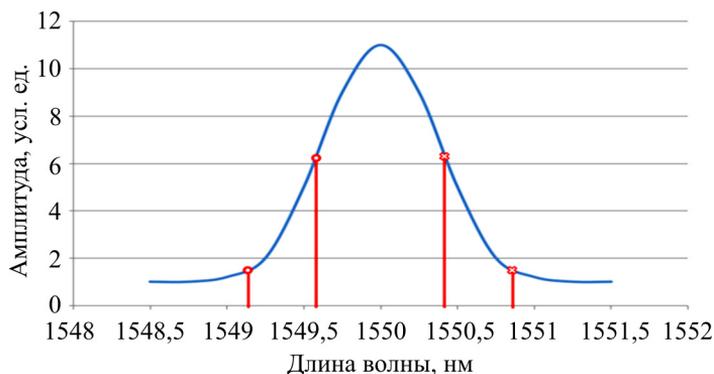


Рис. 1. Набор значений (длина волны и амплитуда сигнала) для двухчастотного зондирования контура ВБР:

$$\{\varphi_i, L_i\} = \{1549.15, 1.85; 1549.6, 6.1; 1550.4, 6.1; 1550.85, 1.85\}, \quad i = 1, 4$$

Необходимо установить все точки пересечения зондирующих импульсов с контуром, которые обозначены кружками. Задача состоит в том, чтобы определить амплитуды в строгом соответствии с длинами волн (частотами) зондирования. Связь между длиной волны и частотой зондирования определяется соотношением $\omega = c/\lambda$, где ω – средняя частота, которая соответствует исходной частоте лазерного излучения и подавляется при формировании двухчастотного зондирующего излучения по методу Ильина–Морозова; c – скорость распространения света. Однако полученное соответствие амплитуд и длин волн может быть продублировано, и для тех же амплитуд может быть найдена другая пара длин волн, помеченных крестиками на рис. 1. Рассмотрим сложившуюся ситуацию.

Если разнос частот $\Delta\epsilon$, по сравнению с зондирующими частотами ω_1 и ω_2 , невелик, то результатом двухчастотного зондирования ВБР, выделяемого на выходе фотодетектора, будут биения частотных компонентов зондирующего излучения, а для анализа будет использована их огибающая. Общий вид огибающей биений – периодическая функция

$$E = E_0 + E_1 \sin(\Delta\epsilon t + \varphi_0), \quad (2)$$

где $\Delta\epsilon = |\omega_1 - \omega_2|$ – разнос частот, который определяется радиочастотой.

Связь между параметрами огибающей кривой и параметрами исходного сигнала определяются соотношениями

$$E_1 = \frac{|A_1 - A_2|}{2}, \quad E_0 = \frac{(A_1 + A_2)}{2}. \quad (3)$$

Рассматривать фазовые соотношения для огибающей, которые также могут быть использованы для определения центральной длины ВБР и восстановления ее контура полностью, на данном этапе не будем, учитывая ограниченный объем статьи.

Коэффициент модуляции огибающей кривой имеет вид

$$M = \frac{E_{\max} - E_{\min}}{E_{\max} + E_{\min}}, \quad (4)$$

где

$$E_{\min} = E_0 - E_1, \quad E_{\max} = E_0 + E_1. \quad (5)$$

Результирующая зависимость коэффициента модуляции от амплитуд двухчастотного зондирования следующая:

$$M = \frac{E_1}{E_0} = \frac{|A_1 - A_2|}{A_1 + A_2}. \quad (6)$$

Подадим сигнал с выхода фотодетектора на аналого-цифровой преобразователь, получим оцифрованный сигнал, по которому определим значения E_{\min} и E_{\max} . Зная минимум и максимум огибающей кривой, получаем значения E_0 и E_1 :

$$E_1 = \frac{E_{\max} - E_{\min}}{2}, \quad E_0 = \frac{E_{\max} + E_{\min}}{2}. \quad (7)$$

Получив амплитуду E_1 и смещение огибающей кривой по оси ординат E_0 и E_1 , определим амплитуды двух частот зондирующего двухчастотного сигнала из соотношений (3).

Раскрытие модуля в первом уравнении (3) приводит к неопределенности сопоставления амплитуд двухчастотного сигнала и частот зондирования:

$$\text{если } A_1 - A_2 > 0, \text{ то } \begin{cases} A_1 = E_0 + E_1, \\ A_2 = E_0 - E_1; \end{cases} \quad (8.1)$$

$$\text{если } A_1 - A_2 < 0, \text{ то } \begin{cases} A_1 = E_0 - E_1, \\ A_2 = E_0 + E_1. \end{cases} \quad (8.2)$$

В качестве результата двухчастотного зондирования получаем набор из двух известных частот ω_1 и ω_2 (или длин волн λ_1 и λ_2) и двух амплитуд A_1 и A_2 . Ввиду того что огибающая кривая на фотодетекторе как при $A_1 > A_2$, так и при $A_1 < A_2$ получается одинаковой, сделать вывод о том, соответствует ли амплитуда A_1 или A_2 длине волны λ_1 или λ_2 , не представляется возможным. Поскольку корреляции между зондирующими длинами волн и их амплитудами нет, то и определить положение контура ВБР не представляется возможным, ибо двум наборам значений $\{\lambda_1, A_1\} \cup \{\lambda_2, A_2\}$ и равнозначному ему набору значений $\{\lambda_1, A_2\} \cup \{\lambda_2, A_1\}$ соответствуют два различных участка контура ВБР вдоль оси абсцисс.

Для снятия такой неопределенности оправданно использование четырех и более зондирующих составляющих.

Перед тем как рассмотреть многочастотное зондирование ВБР-контура, рассмотрим частный случай четырехчастотного зондирования. Покажем на его примере, что четырехчастотное зондирование дает большее количество информации и позволяет не только определить амплитуды всех частот зондирования, но и разрешить сопоставление амплитуды ВБР-контура с частотой (длиной волны) зондирования для всех зондирующих частот.

На рис. 2 изображено четырехчастотное зондирование ВБР-контура. Необходимо определить все точки пересечения зондирующих импульсов с профилем, которые обозначены кружками. Задача состоит в том, чтобы определить амплитуды в строгом соответствии с длинами волн (частотами) зондирования.

Радиофотонную схему многочастотного зондирования можно реализовать двумя различными способами: с додетекторным разделением каналов по двум парам зондирующих сигналов с одинаковыми разностными частотами (например, с помощью УВР и набора фотоприемников) и последетекторным с помощью фильтров на каждую из разностных частот при их неравенстве и одном фотодетекторе. Во втором случае основным требованием алгоритма является требование к разностным частотам, которые должны быть такими, чтобы они при попарном формировании не совпадали и позволяли выделить разные частоты на разных фильтрах.

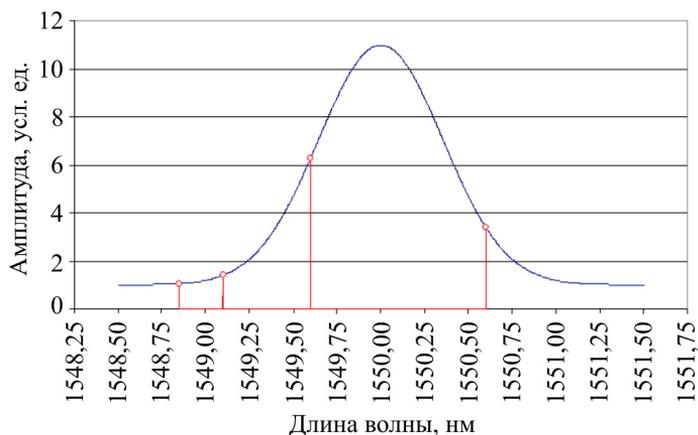


Рис. 2. Набор значений (длина волны и амплитуда сигнала) для четырехчастотного зондирования контура ВБР:

$$\{\varphi_i, L_i\} = \{1548.85, 1.051; 1549.1, 1.396; 1549.6, 6.276; 1550.6, 3.379\}, \quad i = \overline{1, 4}$$

При четырехчастотном зондировании мы имеем четыре зондирующих частоты $\omega_i, i = \overline{1, 4}$ и четыре соответствующих этим частотам длины волн $\lambda_i, i = \overline{1, 4}$.

Суть метода четырехчастотного зондирования заключается в том, чтобы путем частотной фильтрации (в оптической или электронной части схемы) для пар зондирующих излучений проанализировать огибающую биений на фотодетекторе. Для этого нам потребуются три независимых измерения биений на фотодетекторе и анализ трех огибающих.

Измерение 1. Для первой пары частот ω_1, ω_2 настраиваем частотный фильтр так, чтобы полоса его пропускания соответствовала разностной частоте частот $f_1 = \omega_2 - \omega_1$. В результате на фотодетекторе получаем сигнал биений с частотой $f_1 = \omega_2 - \omega_1$ и вычисляем в соответствии с алгоритмом двухчастотного зондирования амплитуды несущих частот. Обозначим их как A_1^1 и A_2^1 . Верхний индекс в обозначении означает порядковый номер измерения, а нижний индекс определяет порядковый номер амплитуды без привязки к порядковому номеру частоты. При этом, как уже было сказано, сделать сопоставление двух частот ω_1 и ω_2 с их амплитудами A_1^1 и A_2^1 невозможно, но на данном этапе этого и не требуется.

Измерение 2. Для второй пары частот ω_2, ω_3 настраиваем частотный фильтр так, чтобы полоса его пропускания соответствовала разностной частоте $f_2 = \omega_3 - \omega_2$. В результате на фотодетекторе получаем сигнал биений с частотой $f_2 = \omega_3 - \omega_2$ и вычисляем в соответствии с алгоритмом двухчастотного зондирования амплитуды несущих частот A_1^2 и A_2^2 также без сопоставления с зондирующими частотами ω_2, ω_3 .

Измерение 3. Для третьей пары частот ω_3, ω_4 настраиваем частотный фильтр так, чтобы полоса его пропускания соответствовала разностной частоте $f_3 = \omega_4 - \omega_3$. В результате на фотодетекторе получаем сигнал биений с частотой $f_3 = \omega_4 - \omega_3$ и вычисляем в соответствии с алгоритмом двухчастотного зондирования амплитуды несущих частот A_1^3 и A_2^3 без сопоставления с зондирующими частотами ω_3, ω_4 .

Алгоритм сопоставления амплитуд в соответствии с их зондирующими частотами будет таков. Для первой пары измерений (измерения 1 и 2) имеем пары частот ω_1, ω_2 и ω_2, ω_3 и две пары амплитуд A_1^1, A_2^1 и A_1^2, A_2^2 . Примем во внимание, что амплитуда ВБР-контура не меняется, а частота ω_2 присутствует и в первом измерении, и во втором. Следовательно, из четырех значений A_1^1, A_2^1 и A_1^2, A_2^2 найдется пара, которая имеет совпадающее значение, т.е. $\exists i, k : A_2 = A_i^1 = A_k^2$. Обозначим это совпадающее значение как A_2 , и оно будет в точности соответствовать частоте зондирования ω_2 , поскольку лишь она присутствует и в первом, и во втором измерениях. Исключив из набора A_1^1, A_2^1 величину A_2 , равную одному из значений A_1^1, A_2^1 , обозначим оставшуюся амплитуду как A_1 и, имея полное на то основание, сопоставим ее с частотой ω_1 . Соответственно, точно так же исключив из набора A_1^2, A_2^2 величину A_2 , равную одному из значений A_1^2, A_2^2 , обозначим ее как A_3 .

Собственно говоря, после первой пары измерений уже получено необходимое соответствие между частотами зондирования и их ампли-

тудами. Фактически уже трехчастотное зондирование дает необходимую информацию для полного определения как недетерминированного, так и детерминированного ВБР-профиля, а также положения его центральной длины волны. Вместе с тем метод наименьших квадратов, который мы используем для определения центральной длины волны ВБР-профиля, обладает таким свойством: чем большее количество значений точек профиля будет принято к рассмотрению, тем большая точность будет в его определении.

Рассмотрим вторую пару измерений (измерения 2 и 3) для частот ω_2 , ω_3 и ω_3 , ω_4 и пары амплитуд A_1^2 , A_2^2 и A_1^3 , A_2^3 . Повторим рассуждения, которые применялись для первой пары измерений. Примем во внимание, что амплитуда ВБР-профиля для ω_3 уже определена. Методом исключения из значений амплитуд A_1^3 , A_2^3 определим амплитуду оставшейся (четвертой) частоты зондирования A_4 .

В результате получим частоты ω_i и точно соответствующие им амплитуды A_i для $i = \overline{1, 4}$. В точном соответствии с частотами зондирования известны и их длины волн $\lambda_i = c / \omega_i$, и амплитуды A_i при $i = \overline{1, 4}$. Набор значений $\{\lambda_i, A_i\}, i = \overline{1, 4}$ является исходным для восстановления недетерминированного профиля ВБР или для нахождения смещения детерминированного профиля ВБР с дальнейшим определением их центральной длины волны.

Алгоритм сопоставления амплитуд зондирования с их частотами для четырехчастотного зондирования может быть распространен и для полигармонического зондирования. Как уже было показано, трехчастотное зондирование и более профиля ВБР позволяет с заданной погрешностью определить длины волн и соответствующие им амплитуды ВБР-контура, если удастся попарно выделить результат воздействия зондирующих частот на ВБР-контур.

Для полигармонического зондирования мы имеем N несущих зондирующих частот ω_i , $i = \overline{1, N}$ и N соответствующих этим частотам длин волн λ_i , $i = \overline{1, N}$. Суть метода полигармонического зондирования не меняется и заключается в том, чтобы путем частотной фильтрации (в оптической или электронной части схемы) попарно проанализиро-

вать результирующую огибающую кривую на фотодетекторе для каждой пары частот. Для этого нам потребуется $N-1$ независимых измерений биений на фотодетекторе и анализ $N-1$ огибающих.

Попарно анализируя результаты биения для частот (ω_{i-1}, ω_i) и (ω_i, ω_{i+1}) при $\forall i = \overline{2, N-1}$ в строгом соответствии с алгоритмом, описанным выше, выделяем амплитуду A_i , соответствующую общей для пары частоте ω_i . Амплитуды A_1 и A_N сопоставляются с частотами ω_1 и ω_N методом исключения из первой и последней пар измерений.

В результате получим частоты ω_i и точно соответствующие им амплитуды A_i для $i = \overline{1, N}$. В точном соответствии с частотами зондирования известны и их длины волн $\lambda_i = c / \omega_i$ и амплитуды A_i при $i = \overline{1, N}$. Набор значений $\{\lambda_i, A_i\}, i = \overline{1, N}$ является исходным для восстановления недетерминированного профиля ВБР или для нахождения смещения детерминированного профиля ВБР.

Полигармоническое зондирование ВБР-контура позволяет получить достаточное количество информации, чтобы исследователь мог определить:

- недетерминированный, но идеальный (например, подчиняющийся закону нормального распределения) ВБР-контур;
- смещение детерминированного контура ВБР, заданного аналитически;
- смещение детерминированного контура ВБР, заданного набором измеренных значений без сканирования.

Метод полигармонического зондирования позволяет исследовать и определить центральную длину волны детерминированного или идеального контура ВБР. В том же случае, если профиль ВБР заранее неизвестен и не является заведомо идеальным, то полигармоническое зондирование может быть использовано для его анализа и восстановления с отклонениями от идеальных значений. Например, по данным полигармонического зондирования можно аппроксимировать вершину профиля ВБР параболой и методом наименьших квадратов [38] с заданной погрешностью.

Принципы получения полигармонического излучения и устройства для их реализации достаточно подробно описаны в работах [3, 9, 12, 30, 33].

Заключение

В первой части статьи рассмотрена проблемная область современных волоконно-оптических сенсорных сетей, в частности ограничения систем интеррогации комплексированных ВОД, построенных на основе ВБР. В результате проведенного исследования проанализированы преимущества их построения на основе радиофотонных и полигармонических методов зондирования. Показано, что использование радиофотонного метода зондирования и анализа измерительной информации по параметрам огибающей биений как минимум двух частотных компонентов позволяет повысить скорость опроса ВОД, проводить фиксированное зондирование без сканирования на известной радиочастоте биений, избежать необходимости поиска центральной длины волны ВБР, проводить регистрацию измеряемого сигнала в области минимальных шумов фотоприемника. Полигармоническое зондирование ВБР-контура позволяет полностью определить недетерминированный, но идеальный (например, подчиняющийся закону нормального распределения) ВБР-контур, выявить смещение детерминированного контура ВБР, заданного аналитически или набором измеренных значений без сканирования, а в некоторых случаях установить несимметричность резонансного контура, что может быть в дальнейшем использовано для приложений в системах с резонансом Фано.

Работа выполнена в рамках проектной части государственного задания Минобрнауки РФ на выполнение НИР в КНИТУ – КАИ на 2012–2016 гг. (программы «Симметрия», «Фотоника» и «Радиофотоника», 3.1962.2014/К), договора от 12 февраля 2013 г. № 02.G25.31.0004 и госконтракта № 14.Z50.31.0023 в рамках Постановления Правительства РФ № 220 от 09.04.2010 г.

Список литературы

1. Capmany J. Microwave photonic signal processing // Journal of Lightwave Technologies. – 2013. – Vol. 31, № 4. – P. 571–586.
2. Minasian R.A., Chan E.H.W., Yi X. Microwave photonic signal processing // Optics Express. – 2013. – Vol. 21, № 19. – P. 22918–22936.
3. Морозов О.Г., Ильин Г.И. Амплитудно-фазовая модуляция в системах радиофотоники // Вестник Поволж. гос. технолог. ун-та. Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2014. – № 1 (20). – С. 6–42.

4. External amplitude-phase modulation of laser radiation for generation of microwave frequency carriers and optical poly-harmonic signals: an overview / O.G. Morozov, G.I. Il'in, G.A. Morozov [et al.] // Proceedings of SPIE. – 2016. – Vol. 9807. – P. 980711.

5. Yao J.P. Microwave photonics for high-resolution and high-speed interrogation of fiber Bragg grating sensors // Fiber and Integrated Optics. – 2015. – Vol. 34. – P. 230–242.

6. Cuadrado-Laborde C. Current trends in short- and long-period fiber gratings // InTech. – 2013. – URL: intechopen.com/books/current-trends-in-short-and-long-period-fiber-gratings (дата обращения: 10.05.2016).

7. Вопросы применения концепции программно-определяемых сетей для систем внутрискважинной волоконно-оптической телеметрии / О.Г. Морозов, И.И. Нуреев, С.В. Феофилактов [и др.] // Нелинейный мир. – 2014. – Т. 12, № 10. – С. 83–92.

8. Software defined down-hole telemetric systems: training course / O.G. Morozov, D.P. Danilaev, P.E. Denisenko [et al.] // Proceedings of SPIE. – 2015. – Vol. 9533. – P. 953311.

9. Poly-harmonic analysis of Raman and Mandelstam–Brillouin scatterings and Bragg reflection spectra / O.G. Morozov, G.A. Morozov, I.I. Nureev [et al.] // InTech. – 2015. – URL: intechopen.com/books/advances-in-optical-fiber-technology (дата обращения: 11.05.2016).

10. Development of a fiber-fed spectrometer for the near IR-domain / I.I. Nureev, S.V. Feofilaktov, D.A. Cherepanov [et al.] // Proceedings of SPIE. – 2015. – Vol. 9533. – P. 95330E.

11. Methods of dispersion improvement in a fiber-fed spectrograph scheme / I.I. Nureev, O.G. Morozov, S.V. Feofilaktov [et al.] // Proceedings of SPIE. – 2016. – Vol. 9807. – P. 98070Y.

12. Маломодовая симметричная рефлектометрия волоконно-оптических структур / под ред. О.Г. Морозова. – Казань: Новое знание, 2013. – 160 с.

13. 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.

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

15. 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.

16. Hybrid fiber Bragg grating long period fiber grating sensor for strain and temperature discrimination / H.J. Patrick, G.M. Williams, A.D. Kersey [et al.] // IEEE Photonics Technology Letters. – 1996. – Vol. 8, № 9. – P. 1223–1223.

17. Liu W., Li W., Yao J.P. Real-time interrogation of a linearly chirped fiber Bragg grating sensor for simultaneous measurement of strain and temperature // IEEE Photonics Technology Letters. – 2011. – Vol. 23, № 18. – P. 1340–1342.

18. Li W., Li M., Yao J.P. A narrow-passband and frequency-tunable micro-wave photonic filter based on phase-modulation to intensity-modulation conversion using a phase shifted fiber Bragg grating // IEEE Transactions of Microwave Theory Technology. – 2012. – Vol. 60, № 5. – P. 1287–1296.

19. Kong F., Li W., Yao J.P. Transverse load sensing based on a dual-frequency optoelectronic oscillator // Optics Letters. – 2013. – Vol. 38, № 14. – P. 2611–2613.

20. Волоконно-оптические технологии в распределенных системах экологического мониторинга / В.Г. Куприянов, О.Г. Морозов, И.Р. Садыков [и др.] // Известия Самар. науч. центра Рос. акад. наук. – 2011. – Т. 13, № 4-4. – С. 1087–1091.

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

22. Структурная минимизация волоконно-оптических сенсорных сетей экологического мониторинга / В.В. Куревин, О.Г. Морозов, В.П. Просвирин [и др.] // Инфокоммуникационные технологии. – 2009. – Т. 7, № 3. – С. 46–52.

23. Комплексный подход к решению задач сетевого мониторинга бортовых систем и устройств электроснабжения транспортных средств на основе волоконно-оптических технологий [Электронный ресурс] / Л.М. Сарварова, В.Ю. Колесников, В.А. Куликов [и др.] // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 6. – URL: science-education.ru/120-16540 (дата обращения: 14.06.2016).

24. Щетка как интеллектуальный узел электродвигателя [Электронный ресурс] / О.Г. Морозов, А.А. Кузнецов, И.И. Нуреев [и др.] // Инженерный вестник Дона. – 2016. – № 1. – URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2016/3525 (дата обращения: 14.06.2016).

25. Smart photonic carbon brush / O.G. Morozov, A.A. Kuznetsov, G.A. Morozov [et al.] // Proceedings of SPIE. – 2016. – Vol. 9807. – P. 98070M.

26. Волоконно-оптический рефрактометрический датчик / И.Р. Садыков [и др.] // Труды МАИ. – 2012. – № 61. – С. 18.

27. Optical refractometric FBG biosensors: problems of development and decision courses / O.A. Stepustchenko, O.G. Morozov, A.N. Gorshunova [et al.] // Proceedings of SPIE. – 2011. – Vol. 7992. – P. 79920D.

28. Морозов О.Г., Степущенко О.А., Садыков И.Р. Модуляционные методы измерений в оптических биосенсорах рефрактометрического типа на основе волоконных решеток Брэгга с фазовым сдвигом // Вестник Поволж. гос. технолог. ун-та. Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2010. – № 3. – С. 3–13.

29. Оценка возможностей применения волоконных решеток Брэгга с гауссовым профилем отражения в качестве датчика температуры / О.Г. Морозов, И.И. Нуреев, А.Ж. Сахабутдинов [и др.] // Вестник Поволж. гос. технолог. ун-та. Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2013. – № 2 (18). – С. 73–79.

30. Маломодовое зондирование датчиков на основе волоконных решеток Брэгга / В.Г. Куприянов, О.Г. Морозов, И.И. Нуреев [и др.] // Науч.-техн. вестник Поволжья. – 2013. – № 4. – С. 200–204.

31. Нуреев И.И. Постановка задач калибровки совмещенных датчиков давления и температуры // Нелинейный мир. – 2015. – Т. 13, № 8. – С. 26–31.

32. Процедура решения задач калибровки совмещенных датчиков давления и температуры / А.Ж. Сахабутдинов, Д.Ф. Салахов, И.И. Нуреев [и др.] // Нелинейный мир. – 2015. – Т. 13, № 8. – С. 32–38.

33. Нуреев И.И. Радиофотонные амплитудно-фазовые методы интеррогации комплексированных датчиков на основе волоконных решеток Брэгга [Электронный ресурс] // Инженерный вестник Дона. – 2016. – № 2. – URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2016/3581 (дата обращения: 24.06.2016).

34. Морозов О.Г., Нуреев И.И. Маломодовые методы интеррогации однотипных ВБР в группе // Фотон-Экспресс. – 2013. – № 6 (110). – С. 241–244.

35. Морозов О.Г., Нуреев И.И., Алюшина С.Г. Полигармонические методы определения температуры на абонентских узлах пассивных оптических сетей // Науч.-техн. вестник Поволжья. – 2014. – Т. 1, № 2. – С. 77–81.

36. Комплексируемый волоконно-оптический датчик контроля рабочих характеристик аккумулятора / В.А. Казаров, О.Г. Морозов, И.И. Нуреев [и др.] // Науч.-техн. вестник Поволжья. – 2016. – № 3. – С. 62–64.

37. Нуреев И.И. Сенсорные пассивные оптические сети и ключевые вопросы применения в них волоконных брэгговских решеток [Электронный ресурс] // Инженерный вестник Дона. – 2016. – № 2. – URL: ivdon.ru/magazine/archive/n2y2016/3605 (дата обращения: 01.07.2016).

38. Сахабутдинов А.Ж., Нуреев И.И., Морозов О.Г. Уточнение положения центральной длины волны ВБР в условиях плохого соотношения сигнал – шум // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2015. – Т. 18, № 3-2. – С. 98–102.

References

1. Capmany J. Microwave photonic signal processing. *Journal of Lightwave Technologies*, 2013, vol. 31, no. 4, pp. 571-586.

2. Minasian R.A., Chan E.H.W., Yi X. Microwave photonic signal processing. *Optics Express*, 2013, vol. 21, no. 19, pp. 22918-22936.

3. Morozov O.G., Il'in G.I. Amplitudno-fazovaya modulyatsiya v sistemakh radiofotoniki [The amplitude-phase modulation in radiophotonic systems]. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Radiotekhnicheskie i infokommunikatsionnye sistemy*, 2014, no. 1 (20), pp. 6-42.

4. Morozov O.G., Il'in G.I., Morozov G.A. [et al.]. External amplitude-phase modulation of laser radiation for generation of microwave frequency carriers and optical poly-harmonic signals. *Proceedings of SPIE*, 2016, vol. 9807, p. 980711.

5. Yao J.P. Microwave photonics for high-resolution and high-speed interrogation of fiber Bragg grating sensors. *Fiber and Integrated Optics*, 2015, vol. 34, pp. 230-242.

6. Cuadrado-Laborde C. Current trends in short- and long-period fiber gratings. *InTech*, 2013, available at: intechopen.com/books/current-trends-in-short-and-long-period-fiber-gratings (accessed 10 May 2016).

7. Morozov O.G., Nureev I.I., Feofilaktov S.V. [et al.]. Voprosy primeneniia kontseptsii programmno-opredeliaemykh setei dlia sistem vnutriskvazhinnoi volokonno-opticheskoi teletrii [Questions on the concept of software-defined networks for downhole fiber-optic telemetry systems]. *Nelineinyi mir*, 2014, vol. 12, no. 10, pp. 83-92.

8. Morozov O.G., Danilaev D.P., Denisenko P.E. [et al.]. Software defined down-hole telemetric systems: training course. *Proceedings of SPIE*, 2015, vol. 9533, p. 953311.

9. Morozov O.G., Morozov G.A., Nureev I.I. [et al.]. Poly-harmonic analysis of Raman and Mandelstam–Brillouin scatterings and Bragg reflection spectra. *InTech*, 2015, available at: intechopen.com/books/advances-in-optical-fiber-technology (accessed 11 May 2016).

10. Nureev I.I., Feofilaktov S.V., Cherepanov D.A. [et al.]. Development of a fiber-fed spectrometer for the near IR-domain. *Proceedings of SPIE*, 2015, vol. 9533, p. 95330E.

11. Nureev I.I., Morozov O.G., Feofilaktov S.V. [et al.]. Methods of dispersion improvement in a fiber-fed spectrograph scheme. *Proceedings of SPIE*, 2016, vol. 9807, p. 98070Y.

12. Malomodovaia simmetrichnaia reflektometriia volokonno-opticheskikh struktur [The low-mode symmetric reflectometry of fiber-optical structures]. Ed. by O.G. Morozov. Kazan': Novoe znanie, 2013. 160 p.

13. Morozov O.G., Aibatov D.L., Sadeev T.S. Sintez dvukhchastotnogo izlucheniia i ego primeneniia v volokonno-opticheskikh sistemakh raspredelenykh i mul'tipleksirovannykh izmerenii [Synthesis of two-frequency radiation and its use in fiber-optic distributed and multiplexed measurement systems]. *Fizika volnovykh protsessov i radiotekhnicheskie sistemy*, 2010, vol. 13, no. 3, pp. 84-91.

14. Morozov O.G., Aibatov D.L., Prosvirin V.P. [et al.]. Amplitudno-fazovye metody formirovaniia zondiruiushchikh izluchanii dlia sistem analiza volokonno-opticheskikh struktur [Amplitude-phase methods for forming the probing radiation for the analysis systems of optical fiber structures]. *Fizika volnovykh protsessov i radiotekhnicheskie sistemy*, 2007, vol. 10, no. 3, pp. 119-124.

15. Morozov O.G. Amplitudno-fazovoe preobrazovanie chastoty v sistemakh vremennoi i chastotnoi reflektometrii volokonno-opticheskikh informatsionnykh i izmeritel'nykh setei [Amplitude-phase frequency conversion in time and frequency domain reflectometry of fiber-optic

measurement and information systems]. *Fizika volnovykh protsessov i radiotekhnicheskie sistemy*, 2004, vol. 7, no. 1, pp. 63-67.

16. Patrick H.J., Williams G.M., Kersey A.D. [et al.]. Hybrid fiber Bragg grating long period fiber grating sensor for strain and temperature discrimination. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1996, vol. 8, no. 9, pp. 1223-1223.

17. Liu W., Li W., Yao J.P. Real-time interrogation of a linearly chirped fiber Bragg grating sensor for simultaneous measurement of strain and temperature. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2011, vol. 23, no. 18, pp. 1340-1342.

18. Li W., Li M., Yao J.P. A narrow-passband and frequency-tunable micro-wave photonic filter based on phase-modulation to intensity-modulation conversion using a phase shifted fiber Bragg grating. *IEEE Transactions of Microwave Theory Technology*, 2012, vol. 60, no. 5, pp. 1287-1296.

19. Kong F., Li W., Yao J.P. Transverse load sensing based on a dual-frequency optoelectronic oscillator. *Optics Letters*, 2013, vol. 38, no. 14, pp. 2611-2613.

20. Kupriianov V.G., Morozov O.G., Sadykov I.R. [et al.]. Volokonno-opticheskie tekhnologii v raspredelennykh sistemakh ekologicheskogo monitoring [Fiber optic technology for environmental monitoring in distributed systems]. *Izvestiia Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*, 2011, vol. 13, no. 4-4, pp. 1087-1091.

21. Aliushina S.G., Denisenko P.E., Morozov O.G. [et al.]. Volokonnye reshetki Bregga s fazirovannoi strukturoi v raspredelennykh informatsionno-izmeritel'nykh sistemakh [Fiber Bragg grating phased structure in distributed information-measuring systems]. *Nelineinyi mir*, 2011, vol. 9, no. 8, pp. 522-528.

22. Kurevin V.V., Morozov O.G., Prosvirin V.P. [et al.]. Strukturnaia minimizatsiia volokonno-opticheskikh sensorykh setei ekologicheskogo monitoring [Structural minimization of fiber-optic sensor networks for environmental monitoring]. *Infokommunikatsionnye tekhnologii*, 2009, vol. 7, no. 3, pp. 46-52.

23. Sarvarova L.M., Kolesnikov V.Iu., Kulikov V.A. [et al.]. Kompleksnyi podkhod k resheniiu zadach setevogo monitoringa bortovykh sistem i ustroistv elektrosnabzheniia transportnykh sredstv na osnove volokonno-opticheskikh tekhnologii [An integrated approach to solving the problems of network monitoring systems and on-board power supply

devices of vehicles on the basis of fiber-optic technology]. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniia*, 2014, no. 6, available at: science-education.ru/120-16540 (14 June 2016).

24. Morozov O.G., Kuznetsov A.A., Nureev I.I. [et al.]. Shchetka kak intellektual'nyi uzel elektrodvigatelia [Brush as smart electroengine unit]. *Inzhenernyi vestnik Dona*, 2016, no. 1, available at: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2016/3525 (14 June 2016).

25. Morozov O.G., Kuznetsov A.A., Morozov G.A. [et al.]. Smart photonic carbon brush. *Proceedings of SPIE*, 2016, vol. 9807, p. 98070M.

26. Sadykov I.R. [et al.]. Volokonno-opticheskii refraktometricheskii datchik [Fiber optic refractometric sensor]. *Trudy Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2012, no. 61, p. 18.

27. Stepustchenko O.A., Morozov O.G., Gorshunova A.N. [et al.]. Optical refractometric FBG biosensors: problems of development and decision courses. *Proceedings of SPIE*, 2011, vol. 7992, p. 79920D.

28. Morozov O.G., Stepushchenko O.A., Sadykov I.R. Moduliatsionnye metody izmerenii v opticheskikh biosensorakh refraktometricheskogo tipa na osnove volokonnykh reshetok Bregga s fazovym sdvigom [The modulation based measurement methods in optical refractometric type biosensors based on fiber Bragg grating with a phase shift]. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Radiotekhnicheskie i infokommunikatsionnye sistemy*, 2010, no. 3, pp. 3-13.

29. Morozov O.G., Nureev I.I., Sakhabutdinov A.Zh. [et al.]. Otsenka vozmozhnostei primeneniia volokonnykh reshetok Bregga s gaussovim profilem otrazheniia v kachestve datchika temperatury [Evaluation of application possibilities of Bragg fiber gratings of reflection with a Gaussian profile as a temperature sensor]. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Radiotekhnicheskie i infokommunikatsionnye sistemy*, 2013, no. 2 (18), pp. 73-79.

30. Kupriianov V.G., Morozov O.G., Nureev I.I. [et al.]. Malomodovoe zondirovanie datchikov na osnove volokonnykh reshetok Bregga [Few-modal sensors sensing based on fiber Bragg gratings]. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Povolzh'ia*, 2013, no. 4, pp. 200-204.

31. Nureev I.I. Postanovka zadach kalibrovki sovmeshchennykh datchikov davleniia i temperatury [Setting objectives on calibration of combined pressure and temperature sensors]. *Nelineinyi mir*, 2015, vol. 13, no. 8, pp. 26-31.

32. Sakhabutdinov A.Zh., Salakhov D.F., Nureev I.I. [et al.]. Protsedura resheniia zadach kalibrovki sovmeshchennykh datchikov davleniia i temperatury [The procedure for solving calibration problems of combined pressure and temperature sensors]. *Nelineinyi mir*, 2015, vol. 13, no. 8, pp. 32-38.

33. Nureev I.I. Radiofotonnye amplitudno-fazovye metody interrogatsii kompleksirovannykh datchikov na osnove volokonnykh reshetok Bregga [Radiophotonics amplitude-phase interrogation methods of complexed sensors based on fiber Bragg gratings]. *Inzhenernyi vestnik Dona*, 2016, no. 2, available at: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2016/3581 (24 June 2016).

34. Morozov O.G., Nureev I.I. Malomodovye metody interrogatsii odnotipnykh volokonnykh breggovskikh reshetok v gruppe. *Foton-Ekspress*, 2013, no. 6 (110), pp. 241-244.

35. Morozov O.G., Nureev I.I., Aliushina S.G. Poligarmonicheskie metody opredeleniia temperatury na abonentskikh uzlakh passivnykh opticheskikh setei [Polyharmonic methods for determining the temperature on the subscriber nodes of passive optical networks]. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Povolzh'ia*, 2014, vol. 1, no. 2, pp. 77-81.

36. Kazarov V.A., Morozov O.G., Nureev I.I. [et al.]. Kompleksirovannyi volokonno-opticheskii datchik kontrolya rabochikh kharakteristik akkumuliatora [Complexed fiber optic battery performance monitoring sensor]. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Povolzh'ia*, 2016, no. 3, pp. 62-64.

37. Nureev I.I. Sensornye passivnye opticheskie seti i kliuchevye voprosy primeneniia v nikh volokonnykh breggovskikh reshetok [Sensory passive optical networks and the key issues of fiber Bragg gratings application inside them]. *Inzhenernyi vestnik Dona*, 2016, no. 2, available at: ivdon.ru/magazine/archive/n2y2016/3605 (01 July 2016).

38. Sakhabutdinov A.Z., Nureev I.I., Morozov O.G. Utochnenie polozheniia tsentral'noi dliny volny VBR v usloviiakh plokhogo sootnosheniia signal – shum [Clarifying the position of the central wavelength of FBG under poor signal-to-noise ratio]. *Fizika volnovykh protsessov i radiotekhnicheskie sistemy*, 2015, vol. 18, no. 3-2, pp. 98-102.

Получено 12.08.2016