

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 2. ЕДИНОЕ ПОЛЕ КОМПЛЕКСИРОВАННЫХ
ДАТЧИКОВ**

Рассмотрены вопросы разработки принципов построения радиофотонных полигармонических систем интеррогации комплексированных датчиков на основе волоконных брэгговских решеток (ВБР). Обсуждаются вопросы развития теории единого поля комплексированных датчиков на основе ВБР как ядра волоконно-оптических сенсорных сетей с учетом преимуществ радиофотонных методов интеррогации по скорости опроса и возможности включения в него однотипных решеток, объединенных в группы. Проведен анализ методов их интеррогации в случае постоянного и изменяющегося числа ВБР в группе. Показаны преимущества использования для указанных случаев методов частотно-смещенной интерферометрии и вариации разностной частоты на основе симметричных полигармонических зондирующих излучений соответственно. Представлены основные принципы построения и интеррогации точечных и квазираспределенных комплексированных датчиков, в том числе параллельного типа.

Ключевые слова: волоконно-оптическая сенсорная сеть, единое поле комплексированных датчиков, группа однотипных волоконных брэгговских решеток, полигармоническое симметричное зондирование, частотно-смещенная интерферометрия, метод вариации разностной частоты, комплексированный датчик параллельного типа, 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 2. UNIFIED FIELD OF COMPLEXED SENSORS**

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. The second part of the article discusses the development of the theory of the unified field of

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

complexed sensors based on FBG, as the nucleus core of the fiber-optic sensor net, taking into account advantages of microwave photonic interrogation methods on probing rate and the possibility of the inclusion of similar gratings, combined in group. The analysis of interrogation methods in the case of permanent and changing the number of FBG in the group was done. The advantages of the use of frequency-shifted interferometry and method of difference frequency variation based on symmetric polyharmonic probing radiation for these cases respectively are shown. The basic principles of construction and interrogation of point and quasi-distributed complexed sensors, including ones of parallel type, are discussed.

Keywords: fiber-optic sensor net, unified field of complexed sensors, group of the same type fiber Bragg gratings, polyharmonic symmetrical probing, frequency-shifted interferometry, method of the difference frequency variation, complexed sensor of parallel type, microwave photonics.

Введение

Очевидно, что при разработке требований к волоконно-оптическим сенсорным сетям [1–3] следует учитывать многообразие различных физических полей, воздействующих на объект контроля или мониторинга, разнообразие его конструктивных узлов, сроков службы, условий эксплуатации, необходимых временных интервалов контроля, качества и информативности получаемых данных. Кроме этого, следует учесть, что необходимо обнаруживать широкий спектр дефектов, присущих современному состоянию объектов контроля.

Учитывая вышеизложенное, общие требования к волоконно-оптическим сенсорным сетям могут быть следующие:

- необходимость контроля значительного количества датчиков и исполнительных устройств, что определяется требованиями оперативности контроля и управления, повышением плотности средств диагностики;
- пространственное распределение средств управления и диагностики по объекту контроля, необходимость их временного разделения и синхронизации;
- возрастание информационных потоков каналов управления и обработки информации, работающих в реальном времени или близком к нему;
- принятие решений, обеспечивающих повышенные требования к сроку службы и надежности объекта контроля.

В этих условиях актуальной становится задача комплексирования волоконно-оптических датчиков (ВОД) и создания их единого поля для улучшения качества контроля и мониторинга (напряжения, температуры, давления и т.д.).

Под единым полем комплексированных датчиков, понятие которого было введено в работах [4–7], будем понимать множество ВОД, расположенных в контрольных зонах объекта контроля или технологи-

чески встроенных в его узлы и агрегаты, позволяющих получать с одного датчика информацию об одном или нескольких физических процессах и соединенных в общую волоконно-оптическую сеть передачи и обработки информации, управления и синхронизации. Иными словами, единое поле комплексированных датчиков – ядро волоконно-оптической сенсорной сети.

В последнее десятилетие основные претензии на лидерство в области построения сенсорных сетей принадлежат беспроводным и волоконно-оптическим технологиям [8, 9]. Однако, если беспроводные mesh-технологии завоевывают сегодня все новые рынки, волоконно-оптические сенсорные технологии практически не вышли со стадии разовых или исключительных приложений: их применение представлено либо системами мониторинга с малым количеством датчиков, либо эксклюзивными многоточечными проектами нефтегазового комплекса.

По нашему мнению, это объясняется рядом факторов, среди которых следует выделить следующие:

- применение спектральных методов измерительного преобразования, сложной и дорогостоящей аппаратуры (оптических анализаторов спектра и т.п.) для их реализации;

- ограниченное количество измерительных каналов, которое может быть построено в одном волокне, без предъявления особых требований на стабильность источников зондирующего излучения;

- невозможность разрешения перекрестных искажений при использовании в измерительном канале одинаковых или однотипных ВБР, объединенных в последовательные группы;

- мультипликативность отклика ВБР на физические поля различной природы.

Введем ряд уточняющих моментов, позволяющих развить понятие единого поля комплексированных датчиков для разработки универсальных требований к построению волоконно-оптических сенсорных сетей и минимизации их структуры при использовании единой элементной базы датчиков и радиофотонных методов интеррогации. Первый из них – множество ВОД, в том числе однотипных (т.е. с одинаковой центральной длиной волны ВБР в условиях калибровки и с полностью перекрывающимися спектрами), объединенных в последовательные группы; второй – соединение в общую волоконно-оптическую сеть передачи и обработки информации, управления

и синхронизации с гибридным временным и волновым уплотнением, использующую радиодиффузные методы интеррогации, адаптированные к разрешению последовательности однотипных датчиков.

Решение поставленных задач возможно на основе разработки:

– эффективных методов и средств измерения параметров различных физических полей, к которым относятся радиодиффузные методы интеррогации на основе оптоэлектронных генераторов с измерительным преобразованием «оптическая длина волны – частота радиосигнала – измеряемая величина» [10–13] и на основе полигармонического зондирования с измерительным преобразованием «оптическая длина волны – амплитуда и фаза радиосигнала – измеряемая величина» [14–28], исключающих использование дорогостоящих средств оптического и оптико-электронного спектрального анализа;

– методических рекомендаций по выбору решений для одновременной регистрации полей различной физической природы с помощью одной или нескольких ВБР, в том числе объединенных в группу, сокращающих используемое число измерительных каналов и разнотипных датчиков и основанных на указанных выше радиодиффузных методах интеррогации.

Проблема разделения информации от различных физических полей решается с момента создания сенсорных систем на базе ВБР и на сегодняшний день имеет широкий спектр найденных решений. Создание единого поля комплексированных датчиков ставит задачу универсализации используемой элементной базы для построения датчиков физического уровня и методологии доставки и обработки информации соответственно на ее транспортном и программно-вычислительном уровнях. Учитывая эти замечания и рассматривая как недостаток пространственный разнос двух последовательно установленных ВРБ на одном волокне, особое внимание следует уделить использованию параллельных решений.

Таким образом, создание универсальных волоконно-оптических сенсорных сетей с минимизированной по элементной базе и числу измерительных каналов структурой требует решения комбинированной задачи по созданию радиодиффузных методов интеррогации последовательности однотипных ВБР, каждая из которых может состоять как минимум из двух параллельных решеток. Учитывая мультипликативность отклика ВБР на температуру, деформации и показатель преломления окружающей среды, таких параллельных решеток может быть три и более.

В первом разделе настоящей части статьи будут проанализированы методы интеррогации одностипных ВБР, объединенных в последовательные группы, а во втором и третьем – представлены варианты интеррогаторов для их опроса: интерферометрического с частотным смещением и амплитудного с вариацией разностной частоты, основанных на преимуществах полигармонического зондирования. В четвертом разделе будут рассмотрены принципы построения комплексированных ВОД, в том числе параллельной структуры на двух и трех решетках, и варианты решения задач раздельной фиксации их отклика на различные физические поля. В заключении будут кратко описаны результаты применения новых подходов для построения единого поля комплексированных датчиков и радиофотонных систем для их интеррогации.

1. Методы интеррогации одностипных ВБР, объединенных в группы

Минимизация количества каналов, задействованных для обслуживания физического уровня измерений, является одной из важных задач при проектировании волоконно-оптических сенсорных сетей. 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.).

Многоточечные, или квазираспределенные, ВОД, состоящие из последовательных ВБР, демонстрируют главное преимущество волоконно-оптических сенсорных сетей: множество датчиков используют одно волокно для передачи по нему в обратном направлении информационных сигналов, которые демультиплексируются одним приемным устройством.

Для минимизации могут быть использованы структуры каналов, содержащие одностипные датчики, объединенные в группы в определенном порядке с изменяющимися по определенному закону коэффициентом отражения, шириной полосы пропускания ВБР и т.д. При этом подразумевается спектральный анализ получаемой информации [29]. Квазираспределенные ВОД можно также реализовать различными способами мультиплексирования: во временной области – TDM

[30–32], в спектральной – WDM [33, 34], в гибридной – TDM-WDM [35], с использованием интерферометрии в частотной области – OFDR [36], с частотным смещением – FSI [37], методом частотно-модулированного непрерывного излучения – CWFM [38, 39] и синтезом функции когерентности – SCF [40].

Данные методы различаются способом выделения информационных сигналов от распределенных датчиков, используют для обработки различные параметры сигналов и имеют свои преимущества и ограничения. В системах с TDM отражения от датчиков разделяются во времени, вследствие чего возникает необходимость в использовании импульсов малой длительности и быстродействующих широкополосных детекторов для достижения высокого пространственного разрешения. В системах с WDM сигналы разделяются по длине волны, что ограничивает рабочие длины волн датчиков. Количество датчиков в системах с WDM ограничено шириной полосы излучения лазера и динамическим диапазоном изменения центральной длины волны ВБР. Использование непрерывного лазерного излучения позволяет предположить возможность использования различных типов частотного мультиплексирования для реализации системы, даже если все решетки в волокне канала будут одинаковы [36, 39]. В интерферометрических методах OFDR, методах CWFM и SCF частота излучения линейно меняется во времени непрерывно или пошагово. Такая связь частоты и времени ведет к изменению частоты биения отраженных от датчиков сигналов при их интерференции с опорным сигналом. В частоте биений закодирована информация о дальности расположения каждого датчика. Опорный сигнал может быть сформирован как в оптической, так и в радиоэлектронной области обработки сигнала. Кроме того, необходимы широкополосные фотодетектор и электронный блок для детектирования всей полосы сигнала биений или эквивалентный по ширине набор канальных узкополосных устройств. В дополнение отметим, что при использовании оптического опорного сигнала диапазон измерений ограничивается еще и временной когерентностью источника излучения.

Интерферометрия со сдвигом по частоте FSI [37, 41–45] позволяет извлечь из информационного сигнала данные как о местоположении, так и о коэффициенте отражения нескольких, даже спектрально перекрывающихся, решеток. В отличие от методов, приведенных выше, FSI основывается на интерференции Саньяка. Измеряемым параметром яв-

ляется разность фаз между двумя составляющими зондирующего излучения, прошедшими одинаковый путь в волокне и имеющими одинаковую частоту, сдвинутую относительно несущего излучения, но получившие данное смещение в различных точках своего пути. Местоположение датчика определяется из соотношения, связывающего изменение фазы и величины сдвига составляющих по частоте.

Метод FSI существенно отличается от метода OFDR, так как не требует опорного сигнала. Это позволяет извлекать информацию с помощью некогерентного источника излучения. В отличие от TDM, в FSI используется источник непрерывного излучения и не требуется фотоприемник с высоким быстродействием. В отличие от WDM, могут опрашиваться несколько датчиков, даже когда их спектры перекрываются. В разнообразных схемах FSI использовались акустооптический модулятор (АОМ) для получения сдвига по частоте в интерферометрической схеме Саньяка [37] (получено пространственное разрешение порядка 5 м, определяемое шагом частоты сканирования модулятора и использованием перестраиваемого источника излучения на длине датчика до 0,6 км), фазовый электрооптический модулятор для создания интерференции боковых полос [41] (получено пространственное разрешение порядка 0,1 м при использовании одноплечевой схемы длиной до 50 м, узкополосного источника излучения и перестраиваемого фильтра), амплитудный электрооптический модулятор для создания интерференции боковых полос [45] (получено пространственное разрешение порядка 0,2 м при использовании одноплечевой схемы до 1,22 км, широкополосного некогерентного источника излучения, состоящего из набора отдельных линий излучения).

Двухчастотное, или полигармоническое, излучение не использовалось ранее в интерферометрическом методе FSI. Преимущество его использования при формировании по методу амплитудно-фазового преобразования оптической несущей Ильина–Морозова [46–48] заключается в возможности уменьшения влияния несущей частоты на постоянную составляющую интерференционного сигнала, а выделение каждой из составляющих с помощью фильтров позволит снять ограничение метода FSI на одинаковость коэффициента отражения датчика во всей полосе частот сканирования модулятора. Формирование полигармонического излучения на основе комб-генератора позволит заменить широкополосный некогерентный источник, а в сумме с ука-

занными выше изменениями – уменьшить перекрестные помехи между датчиками, повысить разрешающую способность, увеличить отношение сигнал – шум и диапазон измерений.

При такой реализации соблюдаются требования единого поля к универсальности элементной базы физического уровня, транспортных магистралей и единства модулей программного обеспечения волоконно-оптических сенсорных сетей. Стоимость типового двухкомпонентного FSI-интеррогатора будет в 3–5 раз меньше стоимости типовой широкополосной системы спектрального анализа (например, на оптическом анализаторе спектра EXFO). Может быть использован один лазерный излучатель и сформирован комб-генератор на несколько каналов измерений. Для их разделения могут быть использованы упорядоченная волноводная решетка и отдельный фотоприемник на каждый из ее каналов. В каждом канале может быть установлено до 5–10 однотипных датчиков [45].

Рассмотрим работу двухкомпонентного FSI-интеррогатора и результаты модельного эксперимента.

2. Интерферометрический двухкомпонентный интеррогатор с частотным смещением на основе амплитудно-фазового преобразования оптической несущей

Чтобы проанализировать двухкомпонентный FSI-интеррогатор, представим излучение комб-генератора в виде суммы узкополосных спектральных составляющих:

$$E_{in}(t) = \sum_{\nu} E_{\nu}(t) = \sum_{\nu} E_{0\nu} \cdot \cos(2\pi\nu t + \phi_{\nu}), \quad (1)$$

где ν , ϕ_{ν} и $E_{0\nu}$ – частота, фаза и амплитуда каждой спектральной составляющей соответственно.

При этом примем, что фаза $E_{\nu}(t)$ не зависит от времени для получения максимально узкой спектральной составляющей, что практически реализуется в комб-генераторах на основе амплитудно-фазового преобразования оптической несущей с узкой шириной линии излучения (десятки килоггерц – единицы мегагерц). Полоса генерации и число составляющих комб-генератора выбираются из условий динамического диапазона измерений, определяемого диапазоном сдвига центральной длины волны ВБР.

На рис. 1 показана структурная схема двухкомпонентного FSI-интеррогатора.

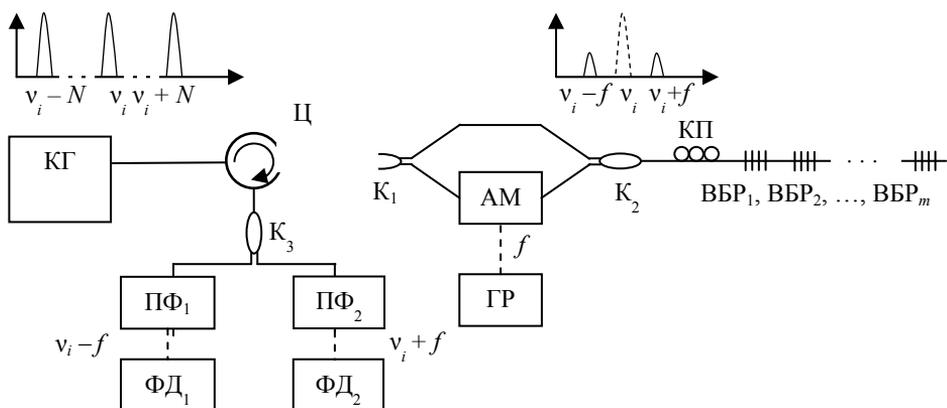


Рис. 1. Структурная схема двухкомпонентного FSI-интеррогатора с комб-генератором (КГ), циркулятором (Ц), амплитудным модулятором (АМ), управляемым генератором радиочастоты (ГР), каплерами (К), контроллером поляризации (КП), полосовыми фильтрами (ПФ), фотодетекторами (ФД) и несколькими (m) слабоотражающими ВБР

Каждая спектральная составляющая $E_\nu(t)$ поступает на последовательность решеток и принимается фотодетекторами, проходя путь одинаковой длины, но получая модулирующее воздействие в разных местах указанного пути. В первом варианте оптическое излучение проходит по верхнему плечу интерферометра Маха–Цендера, отражается от решеток, модулируется в амплитудном модуляторе синусоидальным радиочастотным сигналом на частоте f в нижнем плече интерферометра Маха–Цендера и поступает на ФД через ПФ. Во втором варианте оптическое излучение проходит по нижнему плечу интерферометра Маха–Цендера, модулируется амплитудным модулятором синусоидальным радиочастотным сигналом на частоте f , отражается от решеток и поступает на ФД через ПФ.

При работе АМ в нулевой рабочей точке на его выходе формируются две боковые составляющие $(\nu_i - f)$ и $(\nu_i + f)$, несущая частота практически подавляется. В первом варианте это формирование осуществляется на обратном пути: $(\nu_i - f)'$ и $(\nu_i + f)'$, во втором – на прямом пути: $(\nu_i - f)''$ и $(\nu_i + f)''$. Боковые составляющие распространяются по одному волокну и содержат в своем амплитудно-фазовом отклике информацию о датчике. Зондирующий ВБР сигнал ν_i проходит

через модулятор на обратном пути в момент времени $t + \delta t_i$, где δt_i – время прохождения в обе стороны между модулятором и i -м сенсором, $\delta t_i = 2nL_i / c$. Фотоприемники (ширина полосы пропускания $\ll f$) реагируют лишь на указанные нами составляющие, выделенные ПФ. Отсюда интенсивность интерференции $(v_i - f)'$ и $(v_i + f)'$ и $(v_i - f)''$ и $(v_i + f)''$, вызванной отражением от i -го датчика, описывается формулой

$$I(f) \propto DC + \sum_i R_i \cos\left(2\pi \frac{2nL_i}{c} f\right) = DC + \sum_i R_i \cos(2\pi F_i f), \quad (2)$$

где DC – постоянный уровень; L_i – расстояние между модулятором и i -м сенсором; R_i – коэффициент отражения i -го сенсора; n – показатель преломления одномодового волокна; c – скорость света в вакууме. Вклад интерференционных составляющих E_v является аддитивным, что означает, что даже некогерентный источник излучения может приводить к подобной интерференции.

Когда частота RF-сигнала f линейно меняется, выходной сигнал превращается в сумму синусоидальных функций от f с частотами $F_i = 2nL_i / c$, определяемыми расположением i -го датчика. После применения быстрого преобразования Фурье (БПФ) интерференционного сигнала $I(f)$ мы получаем расстояния до датчиков L_i и коэффициенты отражения R_i . Данный метод использует интерференцию в низкокогерентном источнике излучения и, по сути, является интерферометром с нулевой длиной опорного канала, что делает его схожим с методом FSI, использующим петлю или линейное включение по схеме интерферометра Саньяка.

Решетки, не входящие в зону зондирования боковых составляющих $(v_i - f)$ и $(v_i + f)$, не вносят искажений в отклик решеток, входящих в указанную зону, и выделяются ПФ, настроенными на другие значения частот (например, $i \pm k$, $i \pm k \pm 1$ и т.д.). Сигнал постоянной составляющей формируется в основном энергией не до конца подавленной оптической несущей. Спектр отражения каждой решетки может быть восстановлен из полученных амплитуд Фурье-преобразования. Поскольку такие амплитуды получаются для двух компонентов $(v_i - f)$ и $(v_i + f)$, точность восстановления спектра повышается.

Пространственное разрешение δL двухкомпонентного FSI-интеррогатора определяется диапазоном перестройки Δ радиочастотного сигнала:

$$\delta L = c / (2n\Delta). \quad (3)$$

Из формулы (2) понятно, что расстояние между модулятором и i -м датчиком, удаленным на L_i , пропорционально частоте интерференционного сигнала F_i . Согласно теореме Котельникова частота дискретизации должна быть больше $2F_i$, $\frac{1}{f_{\text{step}}} \geq 2F_i = 4nL_i / c$. Таким образом, максимальный диапазон измерения равен

$$L_{\text{max}} = \frac{c}{4nf_{\text{step}}}. \quad (4)$$

Высокое пространственное разрешение и больший диапазон измерений могут быть достигнуты с помощью увеличения частоты сканирования и подбора оптимального шага сканирования. Заметим, что модулятор должен работать в двунаправленном режиме. Электрооптические модуляторы (ЭОМ) являются двунаправленными, однако на высоких частотах возрастает разность в скорости распространения света в обратном направлении и радиочастотного сигнала – в прямом, что снижает эффективность модуляции. Это главный фактор, ограничивающий частоту сканирования и, следовательно, пространственное разрешение. Чувствительность системы и диапазон измерения зависят от соотношения сигнал – шум детектируемого сигнала, который, в свою очередь, зависит от потерь в системе и эффективности модуляции ЭОМ. В сигнал, отраженный от наиболее удаленных датчиков, также вносятся шумы ближних датчиков. При мощности источника в несколько милливатт можно детектировать датчики с разрешением по коэффициенту отражения менее 0,1 % и динамическим диапазоном измерения 10–20 дБ [45].

Решение задачи восстановления спектра ВБР может быть сведено к решению задачи двухчастотного зондирования [1]. Как известно, для эффективного двухчастотного зондирования необходима разностная частота, равная полуширине исследуемой ВБР. Такой разнос можно получить при перестройке частоты f в диапазоне 10–30 ГГц, однако в этом случае ограничение накладывает различие модуляционных

свойств АМ в прямом и обратном направлениях. Таким образом, наиболее простым вариантом такой реализации метода может быть использование комб-генератора, разность частот которого ν и $\nu + 1$ удовлетворяет указанному выше диапазону.

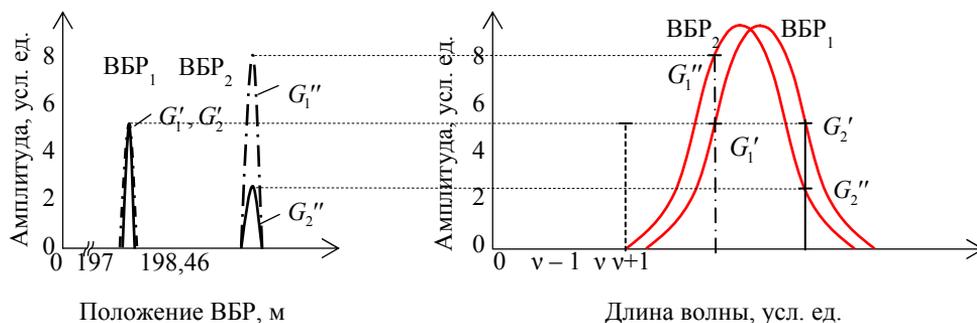


Рис. 2. Коэффициенты отражения двух ВБР для разных частот ν и $\nu + 1$ (а) и восстановленные спектры решеток (б), которые расположены последовательно друг за другом на расстоянии 1,46 м

На рис. 2 показаны коэффициенты отражения двух ВБР для разных частот ν и $\nu + 1$ (см. рис. 2, а) и восстановленные спектры решеток (см. рис. 2, б), которые расположены последовательно на расстоянии 1,46 м.

3. Интеррогатор на основе метода вариации разностной частоты

В описанной во втором разделе задаче число ВБР было неизменным. Нами в ряде работ [17, 18] были 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 их может быть установлено до 32, а с учетом всех восьми колес – до 256 со встроенными в них последовательностями однотипных ВБР (до 5–10 единиц).

Огибающую спектра для нескольких слабоотражающих последовательно расположенных решеток ВБР можно определить, как в работе [49]:

$$I_{ri}(\lambda) = (1 - R(\lambda))^{2(i-1)} R(\lambda) I_0(\lambda), \quad (5)$$

где $R(\lambda)$ – коэффициент отражения решетки; i – количество решеток; $I_0(\lambda)$ – спектральная интенсивность источника излучения. Изменение

фактора i при изменении общей длины ВБР (происходит стирание решеток) приводит к изменению общей ширины спектра ВБР (частотный параметр измерений) и величины коэффициента отражения $R(\lambda)$ (амплитудный параметр измерений).

Описанные в формуле (5) 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 уменьшается, а спектр огибающей сужается, и брэгговская структура приобретает форму одинарной ВБР при износе трех первых в последовательности решеток (рис. 3). Отметим, что показаны случаи только полного износа ВБР с учетом того, что их температурные сдвиги одинаковы, в том числе и при изменении общей длины одной ВБР, т.е. в случае ее частичного стирания.

Анализ рис. 3 позволил синтезировать метод определения числа ВБР в последовательности, а соответственно, и уровня износа щетки, 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 [50], основанный на соотношении

$$Q_{1,2} = \frac{v_{\text{FBG}}}{f_1 - f_2} \sqrt{\frac{i_{\text{out}(v_{\text{FBG}})} - 1}{i_{\text{out}1,2}}}, \quad (6)$$

где $i_{\text{out}(v_{\text{FBG}})}$ и $i_{\text{out}1,2}$ – амплитуды максимума огибающей спектра и компонентов двухчастотного излучения на выходе фотоприемника, когда центральная частота составляющих f_1 и f_2 настроена на центр спектральной характеристики. Значения $i_{\text{out}1,2}$ определяются по выходным сигналам фотоприемника, параметр $i_{\text{out}(v_{\text{FBG}})}$ неизвестен. 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 (6) как

$$Q_{3,4} = \frac{v_{\text{FBG}}}{f_3 - f_4} \sqrt{\frac{i_{\text{out}}(v_{\text{FBG}})}{i_{3,4}} - 1}. \quad (7)$$

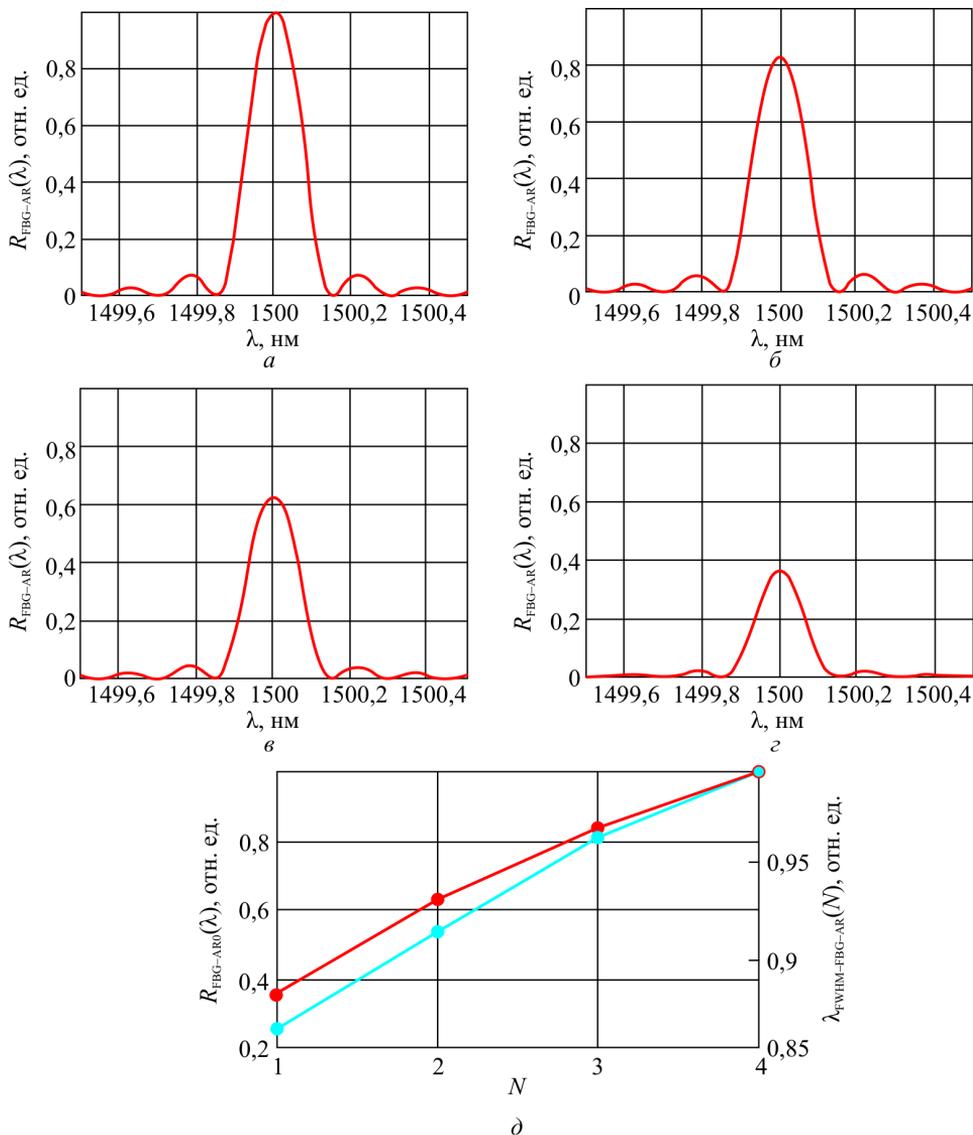


Рис. 3. Огибающая спектра отражения $R_{\text{FBG-AR}}(\lambda)$ для четырех (а), трех (б), двух (в), одной (г) однотипных ВБР и зависимость изменения коэффициента отражения $R_{\text{FBG-ARD}}(N)$ и ширины $\lambda_{\text{FWHM-FBG-AR}}(N)$ по уровню 3 дБ общего спектра решеток от их количества N (д)

Поскольку $Q_{1,2} = Q_{3,4}$, путем совместного решения уравнений (6) и (7) получим $i_{\text{out}(v_{\text{FBG}})}$. Затем, подставляя это значение в любое из выражений, получим значение максимума огибающей спектра, на основании чего будут определены величина износа или количество ВБР. Можно заметить, что при большем коэффициенте отражения задача решается более информативно, хотя число решеток в последовательности уменьшается.

В работах [17, 18] нами показаны спектральные характеристики ВБР различных типов: классических с гауссовой формой, с фазовым π -сдвигом, в структуре интерферометра Фабри–Перо на основе двух ВБР при их частичном износе. Данная информация может быть использована для анализа последовательности таких решеток по предложенному методу вариации разностной частоты при частичном износе ВБР.

Измерение величины износа может быть осуществлено либо по амплитудным характеристикам отраженного от последовательности решеток лазерного излучения, либо по общей спектральной характеристике, для чего необходимо определить расширение спектра на определенном зафиксированном уровне. В первом случае погрешность измерения будет определяться величиной младшего разряда АЦП в системе регистрации, во втором – эта величина будет определяться погрешностью интеррогатора. В обоих случаях достижимо измерение величины износа в десятых долях микрон.

4. Интеррогация комплексированных ВОД при их полигармоническом зондировании

Одна из частных задач исследований в области эксплуатации аккумуляторных батарей – повышение точности и достоверности измерения плотности электролита при изменении температуры окружающей среды от -60 до $+60$ °С, а также разработка способа, позволяющего автоматизировать процесс измерения и максимально упростить конструкцию устройства в составе системы диагностирования, например свинцовых аккумуляторов, для обеспечения непрерывного контроля плотности электролита в течение срока их эксплуатации на основе ВОД.

Температура также является одним из наиболее важных параметров, указывающих на выход из строя батареи литийионных аккумуляторов, но даже в самых современных системах управления батареями не

предусмотрен контроль распределения температуры по всему аккумулятору [28]. В связи с этим дополнительным параметром, который может свидетельствовать о температурном профиле, может служить изменение размеров (объема) аккумуляторной батареи. Оба указанных параметра, также как и показатель преломления (ПП), могут быть одновременно проконтролированы с помощью ВОД контроля рабочих характеристик аккумулятора, состоящего из нескольких ВБР с фазовым π -сдвигом.

Решение задачи одновременного измерения ПП и температуры было предложено нами в работах [19–21]. При этом использовался двухчастотный метод зондирования как ее центрального лоренцевского контура пропускания, так и внешнего гауссова контура отражения. Обработка сигнала велась для огибающих на соответствующих промежуточных частотах для каждого из контуров. При этом формируется двухконтурная система измерений с «грубым» гауссовским и «точным» лоренцевским контурами. Структура комплексированного датчика для измерения температуры и показателя преломления показана на рис. 4.

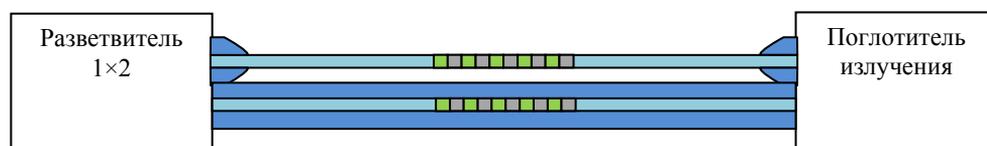


Рис. 4. Эскиз структурной схемы ВОД параллельной структуры из двух решеток: сверху – волокно с выравненной оболочкой ВБР₂ показателя преломления; снизу – волокно с целой оболочкой ВБР₁ температуры

Центральные длины волн решеток ВБР₁ и ВБР₂ при одинаковой температуре отличаются в силу выравливания в ВБР₂ оболочки волокна на определенную глубину. На уровне зондирования это выражается в необходимости использования двух источников двухчастотного излучения, настроенных соответственно на средние длины волн λ_1 и λ_2 , и решения уравнения раздельно для температуры и коэффициента преломления аналогично задаче для сдвоенных решеток [8, 9, 22–24].

В этом случае расстройкам, полученным при двухчастотном зондировании на каждой из длин волн, не ставится в соответствие какой-либо из физических параметров, а проводится дополнительная процедура вычислений по следующим алгоритмам.

Выходные сигналы U_{R_1} и U_{R_2} для огибающих на промежуточных частотах описываются следующими выражениями:

$$U_{R_1} = \delta_{T_1}(\lambda_1)T + \delta_{n_{eff1}}(\lambda_1)n_{eff}, \quad (8)$$

$$U_{R_2} = \delta_{T_2}(\lambda_2)T + \delta_{n_{eff2}}(\lambda_2)n_{eff}, \quad (9)$$

где $\delta_{T_1}(\lambda_1), \delta_{n_{eff1}}(\lambda_1), \delta_{T_2}(\lambda_2), \delta_{n_{eff2}}(\lambda_2)$ – известные коэффициенты на измерительных характеристиках, соответствующие зависимостям расстройки решеток, предварительно настроенных на длины волн λ_1 и λ_2 по температуре и эффективному ПП.

Отсюда

$$T = \frac{U_{R_1} \delta_{n_{eff2}}(\lambda_2) - U_{R_2} \delta_{n_{eff1}}(\lambda_1)}{\delta_{T_1}(\lambda_1) \delta_{n_{eff2}}(\lambda_2) - \delta_{T_2}(\lambda_2) \delta_{n_{eff1}}(\lambda_1)}, \quad (10)$$

$$n_{eff} = \frac{U_{R_2} \delta_{T_1}(\lambda_1) - U_{R_1} \delta_{T_2}(\lambda_2)}{\delta_{T_1}(\lambda_1) \delta_{n_{eff2}}(\lambda_2) - \delta_{T_2}(\lambda_2) \delta_{n_{eff1}}(\lambda_1)}. \quad (11)$$

Эти математические вычисления выполняются в программном блоке ВОД и позволяют одновременно получить значения параметров температуры и эффективного коэффициента преломления в зоне расположения ВБР₁ и ВБР₂.

С учетом деформаций растяжения – сжатия брэгговская длина волны ВБР меняет свое значение в зависимости от приложенных к ней температуры и натяжения:

$$\Delta\lambda = \lambda_B (1 - P_e) \epsilon + (\xi_s + \alpha_s) \Delta T, \quad (12)$$

где P_e – коэффициент фотоупругости; ξ_s – термооптический коэффициент ($\approx 7 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$); α_s – коэффициент теплового расширения ($\approx 5 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-1}$) волокна. Известные значения разрешающей способности по температуре и натяжению составили 0,5 К и 1 мкм/м соответственно.

С учетом рассмотренных положений нами предложена параллельная структура ВОД, аналогичная [19–21], но состоящая из трех ВБР (рис. 5).

Поскольку решетки расположены параллельно и в одном месте, идентичны по размерам и комплексированы через разветвитель, они воспринимаются как одна решетка. Центральные длины волн решеток ВБР₁, ВБР₃ и ВБР₂ при одинаковой температуре отличаются в силу

вытравливания в ВБР₂ оболочки волокна на определенную глубину. Если решетка ВБР₃ для контроля размера электрода жестко будет к нему прикреплена, то ее центральная длина волны также будет отличаться и от центральной длины волны ВБР₁. На уровне зондирования это выражается в необходимости использования полигармонического источника зондирующего излучения (комб-генератора) [25–28], настроенного соответственно на средние длины волн решеток λ_1 , λ_2 и λ_3 , и решения уравнений отдельно для температуры и коэффициента преломления (8)–(11) и аналогично для температуры и растяжения электрода.

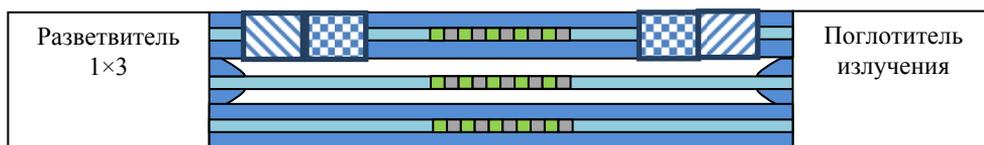


Рис. 5. Эскиз структурной схемы ВОД параллельной структуры из трех решеток: сверху – волокно с целой оболочкой ВБР₃ растяжения с условно показанными зонами крепления (шахматная заливка) и гибким подводом волокна (косячая заливка); в центре – волокно с вытравленной оболочкой ВБР₂ показателя преломления; снизу – волокно с целой оболочкой ВБР₁ температуры

Подобный ВОД может быть изготовлен и на кольцевых структурах в различных вариантах [28]. Вертикальная конфигурация: ВБР₁ крепится на электрод, ВБР₂ выполняется вытравленной, зоны фазового π -сдвига ВБР₁, ВБР₂ и ВБР₃ располагаются друг над другом, но так, чтобы ВБР₂ и ВБР₃ были изолированы от деформаций ВБР₁. Горизонтальная конфигурация: решетки расположены так, что ВБР₂ и ВБР₃ в зоне измерения находятся друг напротив друга, а чувствительная зона решетки ВБР₁ направлена в их сторону или установлена параллельно ВБР₃ также с изоляцией по деформации.

Спектральные характеристики зондирующего излучения для ВОД на двух и трех решетках показаны на рис. 6.

Для демонстрации выбраны четырехчастотное излучение для ВОД на двух решетках (см. рис. 6, *a*) и восьмичастотное для ВОД на трех решетках (см. рис. 6, *б*), причем одна из крайних его пар может быть использована для построения опорного канала.

Результаты моделирования ВОД представлены на рис. 7.

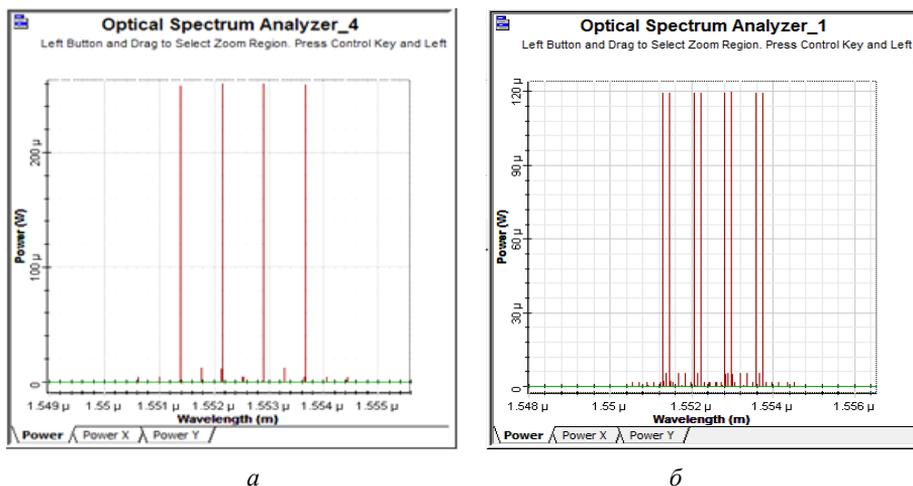


Рис. 6. Излучение на выходе комб-генератора: *a* – четырехчастотное для ВОД на двух ВБР; *б* – восьмичастотное для ВОД на трех ВБР

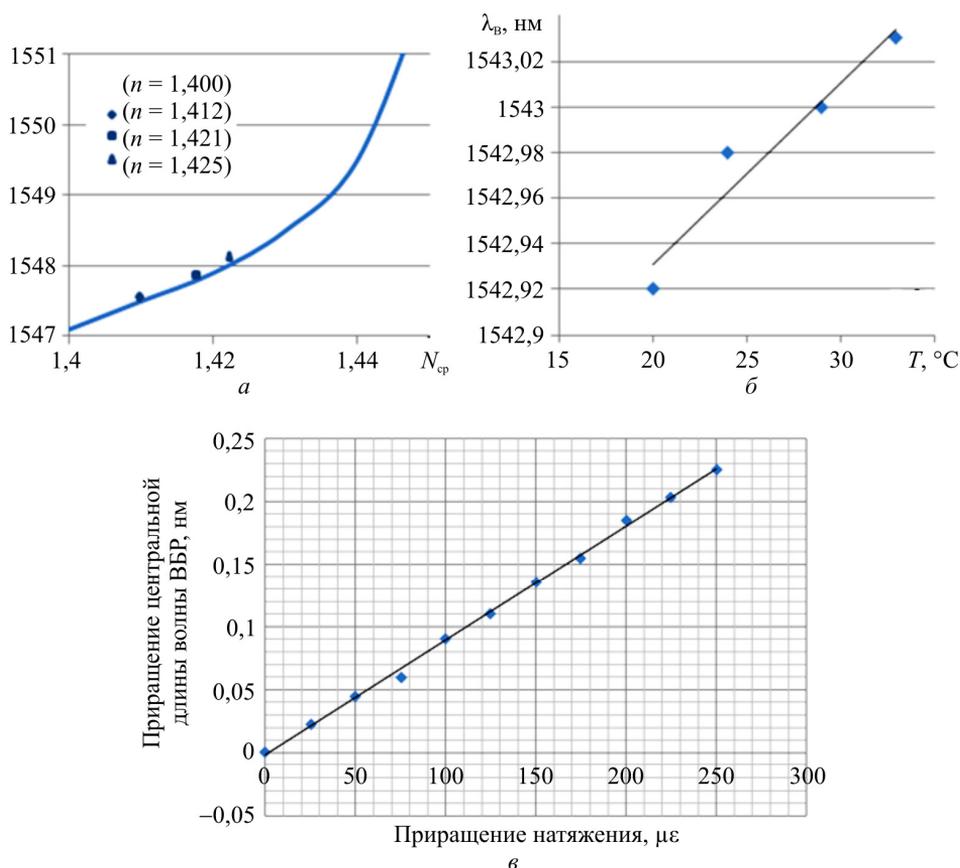


Рис. 7. Измерительные характеристики комплексированного ВОД: *a* – показатель преломления; *б* – температура; *в* – натяжение

Детектирование изменений коэффициента преломления может быть проведено на уровне 10^{-6} RIU. Показанные четыре точки на рис. 7, а соответствуют плотности электролита 1,42, 1,5, 1,62 и 1,7 г/см³. Погрешность измерения температуры (см. рис. 7, б) составила 0,1 °С. На рис. 7, в показано приращение центральной длины волны решетки при измерении деформаций натяжения.

Экспериментально полученные значения трендов показали, что чувствительность ВБР с фазовым π -сдвигом по температуре составила $\approx 7,72$ пм/°С, а по давлению – $\approx 0,91$ пм/με по центру окна прозрачности.

Заключение

Рассмотрена проблемная область развития единого поля комплексированных датчиков для создания универсальных волоконно-оптических сенсорных сетей с минимизированной по элементной базе и числу каналов измерения структурой.

Показано, что в общем случае единое поле может содержать каналы из последовательных однотипных датчиков, каждый из которых может быть представлен параллельным соединением как минимум двух однотипных брэгговских решеток. Описаны преимущества использования для интеррогации последовательных датчиков интерферометрии со смещением частоты при неизменном их числе и метода вариации разностной частоты при изменяющемся. Представлены параллельная структура комплексированного датчика для одновременного измерения температуры, натяжения и показателя преломления и методы его интеррогации. Приведены примеры элементов волоконно-оптических сенсорных сетей для контроля износа щеток электродвигателей и мониторинга параметров аккумуляторных батарей на основе комплексированных датчиков. Сделанные выводы подтверждены результатами модельных и физических экспериментов.

В третьей части статьи будут представлены разработанные комплексированные датчики единого поля с линеаризованными спектральными характеристиками, показаны результаты создания универсальных радиофотонных интеррогаторов и возможности расширения функционального назначения последних для анализа распределенных ВОД.

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. Нуреев И.И. Радиофотонные полигармонические системы интеррогации комплексированных датчиков на основе волоконных брэгговских решеток. Часть 1. Радиофотонные полигармонические методы зондирования // Прикладная фотоника. – 2016. – № 3. – С. 193–220.

2. 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: 25.05.2016).

3. Perez-Herrera R.A., Lopez-Amo M. Fiber optic sensor networks // Optical Fiber Technology. – 2013. – Vol. 19, № 6 (part B). – P. 689–699.

4. Морозов О.Г., Польский Ю.Е. Единое поле комплексированных ВОД в системах контроля параметров безопасности скоростных транспортных средств // Вестник Казан. гос. техн. ун-та им. А.Н. Туполева. – 1997. – № 4. – С. 27–30.

5. Morozov O.G., Pol'ski Y.E. Perspectives of fiber sensors based on optical reflectometry for nondestructive evaluation // Proceedings of SPIE. – 1996. – Vol. 2944. – P. 178–183.

6. Pol'skii Y.E., Morozov O.G. Joint field of integrated fibre optic sensors for aircrafts and spacecrafts safety parameters monitoring // Proceedings of SPIE. – 1998. – Vol. 3397. – P. 217–223.

7. Pol'skii Y.E., Morozov O.G. Built-in fiber sensors for safe use of aircraft // Proceedings of SPIE. – 1996. – Vol. 2945. – P. 212–216.

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

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

10. 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.

11. 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.

12. 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.

13. 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.

14. 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: 10.06.2016).

15. 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.

16. 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.] // *Proceeding of SPIE*. – 2016. – Vol. 9807. – P. 980711.

17. Щетка как интеллектуальный узел электродвигателя / 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: 10.06.2016).

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

19. Волоконно-оптический рефрактометрический датчик [Электронный ресурс] / И.Р. Садыков [и др.] // *Труды МАИ*. – 2012. – № 61. –

URL: www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=35667 (дата обращения: 10.05.2016).

20. 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.

21. 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.

22. 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.

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

24. 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.

25. 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.

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

27. 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.

28. Комплексованный 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.

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

30. Application of optical time-domain reflectometry for the interrogation of fiber Bragg sensors / Yu.N. Kulchin, O.B. Vitrik, A.V. Dyshlyuk [et al.] // *Laser Physics*. – 2007. – Vol. 17, № 11. – P. 1335–1339.

31. Combined time-wavelength interrogation of fiber-Bragg gratings based on an optical time-domain reflectometry / Yu.N. Kulchin, O.B. Vitrik, A.V. Dyshlyuk [et al.] // *Laser Physics*. – 2008. – Vol. 18, № 11. – P. 1301–1304.

32. Differential reflectometry of FBG sensors in the wide spectral range / Yu.N. Kulchin, O.B. Vitrik, A.V. Dyshlyuk [et al.] // *Laser Physics*. – 2011. – Vol. 21, № 2. – P. 304–307.

33. Orr P., Niewczas P. High-speed, solid state, interferometric interrogator and multiplexer for fiber Bragg grating sensors // *Journal of Lightwave Technology*. – 2011. – Vol. 29. – P. 3387–3392.

34. Kersey A.D., Berkoff T.A., Morey W.W. Multiplexed fiber Bragg grating strain-sensor system with a fiber Fabry–Perot wavelength filter // *Optics Letters*. – 1993. – Vol. 18. – P. 1370–1372.

35. A large capacity sensing network with identical weak fiber Bragg gratings multiplexing / M. Zhang, Q. Sun, Z. Wang [et al.] // *Optics Communications*. – 2012. – Vol. 285. – P. 3082–3087.

36. Use of 3000 Bragg grating strain sensors distributed on four 8-m optical fibers during static load tests of a composite structure / A. Childers, M.E. Froggatt, S.G. Allison [et al.] // *Proceedings of SPIE*. – 2001. – Vol. 4332. – P. 133–142.

37. Using frequency-shifted interferometry for multiplexing a fiber Bragg grating array / F. Ye, L. Qian, Y. Liu, B. Qi // *IEEE Photonics Technology Letters*. – 2008. – Vol. 20. – P. 1488–1490.

38. Multiplexing of fiber Bragg grating sensors using an FMCW technique / P.K.C. Chan, W. Jin, J.M. Gong, M.S. Demokan // *IEEE Photonics Technology Letters*. – 1999. – Vol. 11. – P. 1470–1472.

39. Zheng J. Analysis of optical frequency-modulated continuous-wave interference // *Applied Optics*. – 2004. – Vol. 43. – P. 4189–4198.

40. Kajiwara K., Hotate K. Multiplexing of long-length fiber Bragg grating distributed sensors based on synthesis of optical coherence function // *IEEE Photonics Technology Letters*. – 2011. – Vol. 23. – P. 1555–1557.

41. Reflectometry based on a frequency-shifted interferometer using sideband interference / B. Qi, F. Ye, L. Qian, H.-K. Lo // *Optics Letters*. – 2013. – Vol. 38. – P. 1083–1085.

42. Large-capacity multiplexing of near-identical weak fiber Bragg gratings using frequency shifted interferometry / Y. Ou, C. Zhou, L. Qian [et al.] // *Optics Express*. – 2015. – Vol. 23. – P. 31484–31495.

43. High-resolution, large dynamic range fiber length measurement based on a frequency-shifted asymmetric Sagnac interferometer / B. Qi, A. Tausz, L. Qian, H.-K. Lo // *Optics Letters*. – 2005. – Vol. 30. – P. 3287–3289.

44. Frequency-shifted Mach–Zehnder interferometer for locating multiple weak reflections along a fiber link / B. Qi, L. Qian, A. Tausz, H.-K. Lo // *IEEE Photonics Technology Letters*. – 2006. – Vol. 18. – P. 295–297.

45. Multipoint sensing with a low-coherence source using single-arm frequency-shifted interferometry / Y. Zhang, F. Ye, B. Qi, L. Qian // *Applied Optics*. – 2016. – Vol. 55, № 21. – P. 5526–5530.

46. 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.

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

48. 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.

49. A quasi-distributed sensing network with time-division multiplexed fiber Bragg gratings / Y. Wang, J. Gong, D.Y. Wang [et al.] // *IEEE Photonics Technology Letters*. – 2011. – Vol. 23, № 1. – P. 70–72.

50. Двухчастотный метод определения параметров резонансных датчиков СВЧ-диапазона / О.Г. Морозов, А.Р. Насыбуллин, Д.А. Веденькин [и др.] // *Вестник Поволж. гос. технолог. ун-та. Радиотехнические и инфокоммуникационные системы*. – 2014. – № 1 (20). – С. 76–86.

References

1. Nureev I.I. Radiofotonnye poligarmonicheskie sistemy interrogatsii kompleksirovannykh datchikov na osnove volokonnykh breggovskikh reshetok. Chast' 1. Radiofotonnye poligarmonicheskie metody zondirovaniia [Radiophotonic polyharmonic interrogation systems of complexed sensors based on fiber Bragg gratings. Part 1. Radiophotonic polyharmonic sensing techniques]. *Prikladnaia fotonika*, 2016, no. 3, pp. 193–220.

2. 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 (accessed 25 May 2016).

3. Perez-Herrera R.A., Lopez-Amo M. Fiber optic sensor networks. *Optical Fiber Technology*, 2013, vol. 19, no. 6, part B, pp. 689-699.

4. Morozov O.G., Pol'skii Iu.E. Edinoe pole kompleksirovannykh VOD v sistemakh kontroliia parametrov bezopasnosti skorostnykh transportnykh sredstv [Unified field of complexed FBG in safety parameters monitoring systems of high-speed vehicles]. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni A.N. Tupoleva*, 1997, no. 4, pp. 27-30.

5. Morozov O.G., Pol'ski Y.E. Perspectives of fiber sensors based on optical reflectometry for nondestructive evaluation. *Proceedings of SPIE*, 1996, vol. 2944, pp. 178-183.

6. Pol'skii Y.E., Morozov O.G. Joint field of integrated fibre optic sensors for aircrafts and spacecrafts safety parameters monitoring. *Proceedings of SPIE*, 1998, vol. 3397, pp. 217-223.

7. Pol'skii Y.E., Morozov O.G. Built-in fiber sensors for safe use of aircraft. *Proceedings of SPIE*, 1996, vol. 2945, pp. 212-216.

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

9. Kupriianov V.G., Stepushchenko O.A., Kurevin V.V. [et al.]. Volokonno-opticheskie tekhnologii v raspredelennykh sistemakh ekologicheskogo monitoringa [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.

10. 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.

11. 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.

12. 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.

13. 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.

14. 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 (accessed 10 June 2016).

15. Morozov O.G., Il'in G.I. Amplitudno-fazovaia moduliatsiia 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.

16. 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.

17. 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 (accessed 10 June 2016).

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

19. Sadykov I.R. [et al.]. Volokonno-opticheskii refraktometricheskiy datchik [Fiber optic refractometric sensor]. *Trudy Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2012, no. 61, available at: www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=35667 (accessed 10 May 2016).

20. 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.

21. Morozov O.G., Stepuchenko 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.

22. Morozov O.G., Nureev I.I., Sakhabutdinov A.Z. [et al.]. Otsenka vozmozhnostei primeneniia volokonnykh reshetok Bregga s gaussovim profilom 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.

23. 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.

24. Sakhabutdinov A.Z., 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.

25. 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.

26. Morozov O.G. Nureev I.I. Malomodovye metody interrogatsii odnotipnykh VBR v gruppe [Low-mode techniques of interrogation of similar FBG groups]. *Foton-Ekspress*, 2013, no. 6 (110), pp. 241-244.

27. 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.

28. 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.

29. Babin S.A., Kablukov S.I., Shelemba I.S. [et al.]. An interrogator for a fiber Bragg sensor array based on a tunable erbium fiber laser. *Laser Physics*, 2007, vol. 17, no. 11, pp. 1340-1344.

30. 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, vol. 17, no. 11, pp. 1335-1339.

31. 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, vol. 18, no. 11, pp. 1301-1304.

32. Kulchin Yu.N., Vitrik O.B., Dyshlyuk A.V. [et al.]. Differential reflectometry of FBG sensors in the wide spectral range. *Laser Physics*, 2011, vol. 21, no. 2, pp. 304-307.

33. Orr P., Niewczas P. High-speed, solid state, interferometric interrogator and multiplexer for fiber Bragg grating sensors. *Journal of Lightwave Technology*, 2011, vol. 29, pp. 3387-3392.

34. Kersey A.D., Berkoff T.A., Morey W.W. Multiplexed fiber Bragg grating strain-sensor system with a fiber Fabry–Perot wavelength filter. *Optics Letters*, 1993, vol. 18, pp. 1370-1372.

35. Zhang M., Sun Q., Wang Z. [et al.]. A large capacity sensing network with identical weak fiber Bragg gratings multiplexing. *Optics Communications*, 2012, vol. 285, pp. 3082-3087.

36. Childers A., Froggatt M.E., Allison S.G. [et al.]. Use of 3000 Bragg grating strain sensors distributed on four 8-m optical fibers during static load tests of a composite structure. *Proceedings of SPIE*, 2001, vol. 4332, pp. 133-142.

37. Ye F., Qian L., Liu Y., Qi B. Using frequency-shifted interferometry for multiplexing a fiber Bragg grating array. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2008, vol. 20, pp. 1488-1490.

38. Chan P.K.C., Jin W., Gong J.M., Demokan M.S. Multiplexing of fiber Bragg grating sensors using an FMCW technique. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1999, vol. 11, pp. 1470-1472.

39. Zheng J. Analysis of optical frequency-modulated continuous-wave interference. *Applied Optics*, 2004, vol. 43, pp. 4189-4198.

40. Kajiwara K., Hotate K. Multiplexing of long-length fiber Bragg grating distributed sensors based on synthesis of optical coherence function. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2011, vol. 23, pp. 1555-1557.

41. Qi B., Ye F., Qian L., Lo H.-K. Reflectometry based on a frequency-shifted interferometer using sideband interference. *Optics Letters*, 2013, vol. 38, pp. 1083-1085.

42. Ou Y., Zhou C., Qian L. [et al.]. Large-capacity multiplexing of near-identical weak fiber Bragg gratings using frequency shifted interferometry. *Optics Express*, 2015, vol. 23, pp. 31484-31495.

43. Qi B., Tausz A., Qian L., Lo H.-K. High-resolution, large dynamic range fiber length measurement based on a frequency-shifted asymmetric Sagnac interferometer. *Optics Letters*, 2005, vol. 30, pp. 3287-3289.

44. Qi B., Tausz A., Qian L., Lo H.-K. Frequency-shifted Mach-Zehnder interferometer for locating multiple weak reflections along a fiber link. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2006, vol. 18, pp. 295-297.

45. Zhang Y., Ye F., Qi B., Qian L. Multipoint sensing with a low-coherence source using single-arm frequency-shifted interferometry. *Applied Optics*, 2016, vol. 55, no. 21, pp. 5526-5530.

46. Morozov O.G., Aibatov D.L., Sadeev T.S. Sintez dvukhchastotnogo izlucheniia i ego primeneniia v volokonno-opticheskikh sistemakh raspredelennykh 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.

47. Morozov O.G., Aibatov D.L., Prosvirin V.P. [et al.]. Amplitudno-fazovye metody formirovaniia zondiruiushchikh izlucheniia 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.

48. Morozov O.G. Amplitudno-fazovoe preobrazovanie chastoty v sistemakh vremennoi i chastotnoi reflektometrii volokonno-opticheskikh

informatsonnykh 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.

49. Wang Y., Gong J., Wang D.Y. [et al.]. A quasi-distributed sensing network with time-division multiplexed fiber Bragg gratings. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2011, vol. 23, no. 1, pp. 70-72.

50. Morozov O.G., Nasybullin A.R., Veden'kin D.A. [et al.]. Dvukhchastotnyi metod opredeleniia parametrov rezonansnykh datchikov SVCh-diapazona [Dual-frequency method for determining the parameters of the resonant microwave sensor]. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Radiotekhnicheskie i infokommunikatsionnye sistemy*, 2014, no. 1 (20), pp. 76-86.

Получено 12.08.2016