

Радиофотонные двухчастотные способы интеррогации однотипных волоконных брэгговских решеток, объединенных в группу

О.Г. Морозов, Г.А. Морозов, И.И. Нуреев,
А.Ж. Сахабутдинов, В.И. Артемьев

Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева - КАИ
420111, Российская Федерация, г. Казань
ул. К. Маркса, 10

В статье представлены принципы работы, оценка метрологических характеристик и варианты реализации радиофотонных способов зондирования группы однотипных ВБР в интеррогаторах на основе интерферометрии со смещением частоты и вариации разностных частот. Впервые показана возможность применения в них двухчастотных зондирующих излучений, полученных с помощью радиочастотного модуляционного амплитудно-фазового преобразования оптической несущей по методу Ильина – Морозова. Определены перспективы применения указанных способов в структуре волоконно-оптических сенсорных сетей.

Ключевые слова: радиофотоника, оптическая несущая, амплитудно-фазовая модуляция, двухчастотное зондирование, волоконная брэгговская решетка, интерферометрия со смещением частоты, метод вариации разностной частоты.

Введение

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 и т. д. Многоточечные или квази-распределенные волоконно-оптические датчики (ВОД), состоящие из последовательности внутриволоконных брэгговских решеток (ВБР), демонстрируют главное преимущество волоконно-оптических сенсорных сетей (ВОСС) – множество датчиков используют одно волокно для передачи по нему в обратном направлении информационных сигналов, которые демultiplexируются одним приемным устройством.

Для минимизации могут быть использованы структуры каналов, содержащие однотипные датчики, объединенные в группы в определенном порядке с изменяющимся по определенному закону коэффициента отражения, ширины

полосы пропускания ВБР и т. д. При этом подразумевается спектральный анализ получаемой информации [1]. Квази-распределенные ВОД, содержащие абсолютно одинаковые ВБР, можно также реализовать различными способами мультиплексирования: во временной области – TDM [2–4], в спектральной – WDM [5; 6], в гибридной – TWDM [7], с использованием интерферометрии в частотной области – IOFDR [8] и с частотным смещением – FSI [9], способов зондирования частотно-модулированным непрерывным излучением оптической несущей – CWFM [10; 11] и синтеза функции когерентности – SCF [12]. Данные способы различаются алгоритмами 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 ограни-

чено 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 [5; 6]. В интерферометрическом способе IOFDR, способах CWFM и SCF частота излучения линейно меняется во времени непрерывно или дискретно. 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 области, так и в радиоэлектронной области обработки сигнала. Также необходимы широкополосные фотодетектор и электронный блок для детектирования всей полосы сигнала биений, или эквивалентный по ширине набор канальных узкополосных устройств. В дополнение следует сказать, что при использовании оптического опорного сигнала диапазон измерений ограничивается еще и временной когерентностью источника излучения.

Следует отметить, что радиофотонное двухчастотное зондирование не использовалось ранее для построения систем получения информации с группы однотипных ВБР. Однако использование для его получения одночастотного непрерывного лазерного излучения позволяет предположить возможность применения частотного мультиплексирования для реализации ВОСС, даже если все ВБР в волокне каждого канала будут одинаковы. В качестве технологии мультиплексирования была предложена двухчастотная IOFDR [13; 14–26], как наиболее согласованная с предложенной и используемой нами методикой радиофотонного двухчастотного зондирования ВБР [27] и нашедшая отражение в работах [28–37].

Далее статья построена следующим образом. В первой части проанализированы преимущества и недостатки радиофотонного двухчастотного зондирования и выбраны способы мультиплексирования ВБР на его основе для постоянного и переменного числа решеток в группе. Во второй части рассмотрена двухчастотная интерферометрия со смещением частоты для «горизонтального» разрешения постоянного ко-

личества решеток, в третьей способ – вариации разностной частоты двухчастотного зондирующего излучения для «вертикального» разрешения решеток, число которых изменяется, например, в динамических системах контроля износа поверхностей при трении. В заключении обсуждены полученные результаты и определены области их применения в ВОСС различного назначения.

1. Двухчастотные способы зондирования однотипных ВБР

При использовании двухчастотной IOFDR соблюдаются требования по универсальности элементной базы физического уровня, транспортных магистралей и единства модулей программного обеспечения единого поля комплексированных ВОД [38]. Может быть использован один ИЗИ на несколько каналов измерений. В каждом канале может быть установлено до пяти-десяти однотипных датчиков с малым коэффициентом отражения.

Анализ работы предложенного метода зондирования группы однотипных ВБР показывает наличие трех существенных недостатков: необходимость применения опорного интерферометра; наложение требования когерентности к зондирующему излучателю; наличие большого количества переотражений между ВБР, которые будут определять уровень перекрестных помех системы.

Минимизацию перекрестных искажений можно произвести путем использования алгоритма послышного исключения [39]. Однако практическая реализация указанного алгоритма требует, во-первых, больших вычислительных затрат, что приводит к уменьшению динамичности всей измерительной системы, во-вторых, ВБР должны удовлетворять требованию обеспечения коэффициента отражения – не более 5 %. Это объясняется как энергетическими, так и интерференционными свойствами системы (основное назначение – уменьшение «хвостов» переотражений от второго и последующих датчиков).

Интерферометрия со сдвигом по частоте FSI [9; 40–44] позволяет извлечь из информационного сигнала данные как о местоположении, так и коэффициенте отражения нескольких, в том числе спектрально перекрывающихся, однотипных решеток. В отличие от методов, приведенных выше, FSI основывается на интерференции

Саньяка. Измеряемым параметром является разность фаз между двумя составляющими зондирующего излучения прошедшими одинаковый путь в волокне и имеющими одинаковую частоту, сдвинутую относительно несущего излучения, но получившие данное частотное 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 низко когерентного источника излучения. В отличие от TDM, в FSI используется источник непрерывного излучения и не требуется фотоприемника 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 [45] (получено пространственное разрешение, порядка 5 м, определяемое шагом частоты сканирования модулятора и использованием перестраиваемого источника излучения на длине датчика до 0,6 км); фазового электрооптического модулятора для создания интерференции боковых полос [46] (получено пространственное разрешение, порядка 0,1 м, при использовании одноплечевой схемы длиной до 50 м, узкополосного источника излучения и перестраиваемого фильтра); амплитудного электрооптического модулятора для создания интерференции боковых полос [47] (получено пространственное разрешение, порядка 0,2 м, при использовании одноплечевой схемы до 1,22 км, широкополосного низко когерентного источника излучения, состоящего из набора отдельных линий излучения).

Двухчастотное зондирующее излучение не использовалось ранее в интерферометрическом методе FSI. Преимущества его использования при формировании по методу амплитудно-фазового преобразования оптической несущей Ильина – Морозова [48–50] заключается в возможности уменьшения влияния несущей частоты на постоянную составляющую интерференционного сигнала, а выделение каждой из составляющих с помощью фильтров позволит снять ограничения метода FSI на одинаковость коэффициента отражения датчика во всей полосе частот скани-

рования модулятора. Формирование полигармонического излучения на основе комб-генератора позволит заменить широкополосный некогерентный источник, а в сумме с указанными выше изменениями уменьшить перекрестные помехи между датчиками, повысить разрешающую способность, увеличить отношение сигнал/шум и диапазон измерений.

При такой реализации соблюдаются требования единого поля по 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 может быть использована упорядоченная волноводная решетка и отдельный фотоприемник на каждый из ее каналов. В каждом канале может быть установлено до пяти–десяти однотипных датчиков с коэффициентом отражения до 10 % [47]. Таким образом двухчастотная интерферометрия со смещением частоты может быть использована для «горизонтального» разрешения постоянного количества однотипных решеток.

В описанных выше способах мультиплексирования и интеррогации число ВБР было неизменно. Нами в ряде работ [51–54] рассмотрены задачи с изменяющимся в процессе измерений числом однотипных ВБР в группе. Эти работы относятся к исследованию ВОД износа трущихся поверхностей, в частности, щеток электродвигателей. Например, в одном приводном двигателе колеса автомобиля БЕЛАЗ может быть установлено до 32, а с учетом всех восьми колес – до 256 щеток с встроенными в них последовательностями однотипных ВБР, до пяти–десяти единиц.

Основными измеряемыми параметрами последовательности одинаковых слабоотражающих ВБР в этом случае являются центральная длина волны и ее сдвиг (определение температуры), ширина полосы пропускания и коэффициент отражения (определение износа). Предлагаемая методика опроса датчиков может быть основана на радиофотонном двухчастотном зондировании, подробно описанном в работах [55–58],

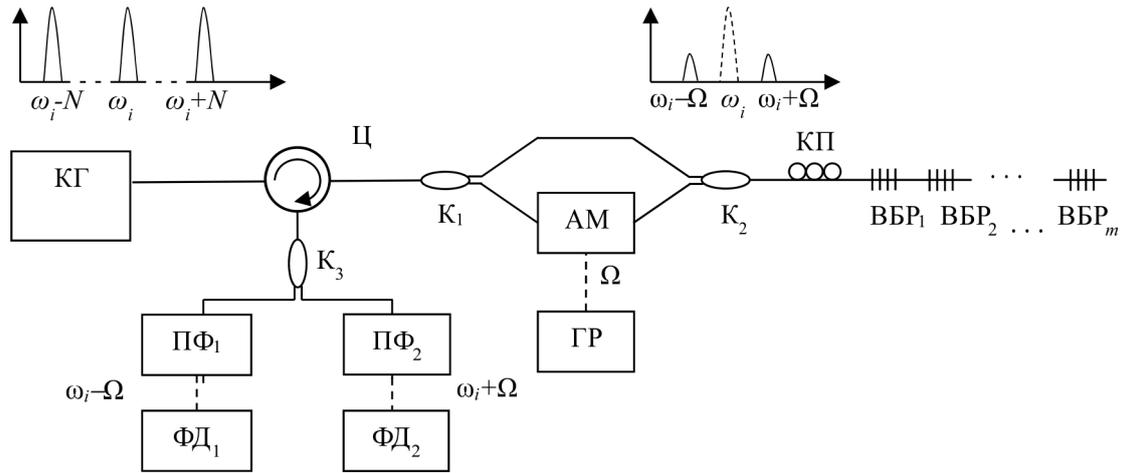


Рис. 1. Структурная схема РДИ ИССЧ

а правильность ее подходов подтверждена близкими работами для радиотехнического диапазона [59; 60], в которых используется способ вариации разностной частоты двухчастотного зондирующего излучения.

Следует отметить, что в том случае, если центральная частота двухчастотного сигнала совпадает с резонансной длиной волны датчика, огибающая выходного сигнала совпадает по фазе с огибающей двухчастотного зондирующего излучения на входе датчика и коэффициент модуляции огибающей выходного двухчастотного излучения принимает максимальное значение равное 1. Для измененной разностной частоты указанные зависимости сохраняются, однако амплитудные значения огибающей позволят определить максимум отражения ВБР и ее силу (добротность).

Таким образом, радиофотонное двухчастотное зондирование с вариацией разностной частоты может быть использовано для «вертикального» разрешения физически переменного количества однотипных решеток при изменении длины волнока, в котором они расположены.

2. Принципы построения радиофотонного двухчастотного интеррогатора на основе интерферометра Саньяка со смещением частоты

Рассмотрим работу радиофотонного двухчастотного интеррогатора на основе интерферометра Саньяка со смещением частоты (РДИ ИССЧ) и результаты модельного физического эксперимента для «горизонтального» разрешения постоянного количества ВБР.

На рис. 1 показана структурная схема РДИ ИССЧ.

Каждая спектральная составляющая $E_{\text{ш}}(t)$ с комбгенератора КГ поступает на последовательность решеток ВБР_m и принимается фотодетекторами, проходя путь одинаковой длины, но получая модулирующее воздействие в разных местах указанного пути. В первом случае оптическое излучение проходит через циркулятор Ц, каплеры К_i и контроллер поляризации КП по верхнему плечу интерферометра Маха – Цендера, отражается от решеток, модулируется в амплитудном модуляторе АМ синусоидальным радиочастотным сигналом на частоте Ω с генератора ГР в нижнем плече интерферометра Маха – Цендера и поступает на фотодетекторы ФД_i через полосовые фильтры ПФ_i. Во втором случае оптическое излучение проходит по нижнему плечу интерферометра Маха – Цендера, модулируется амплитудным модулятором АМ синусоидальным радиочастотным сигналом на частоте Ω, отражается от решеток, и поступает на ФД_i через ПФ_i. Вклад интерференционных составляющих E_{ω} является аддитивным, что означает, что даже некогерентный источник излучения может приводить к подобной интерференции. Интерферометр Саньяка формируется интерферометром Маха – Цендера и каждой из решеток канала измерения.

Рассмотрим второй случай, когда оптическое излучение от лазера проходит по нижнему плечу интерферометра Маха – Цендера.

В данном случае напряженность поля на выходе модулятора Маха – Цендера при работе в «нулевой» точке будет иметь вид:

$$E_{\text{АМ}}(t) = E_0 \sin\left(\frac{\Gamma}{2}\right) \cos \omega t, \quad (1)$$

где E_0 – напряженность поля на входе модулятора Маха – Цандера; ω – частота генерации лазера; Γ – фаза одночастотного оптического излучения, прошедшего через модулятор Маха – Цандера. Фаза Γ описывается выражением

$$\Gamma = \Gamma_0 \sin \Omega t, \quad (2)$$

где Γ_0 – независящий от времени фазовый сдвиг. Величина Γ_0 определяется как

$$\Gamma_0 = \pi \frac{U_m}{U_{\lambda/2}}, \quad (3)$$

где U_m – модулирующее напряжение; $U_{\lambda/2}$ – полуволновое напряжение.

В результате напряженность поля на выходе модулятора Маха – Цандера при работе в «нулевой» точке примет вид двухчастотного излучения с подавленной несущей:

$$E_{AM}(t) = E_0 \sin\left(\frac{\Gamma_0}{2} \sin \Omega t\right) \cos \omega t. \quad (4)$$

Как видно из (4) модуляционная характеристика модулятора Маха – Цандера по напряженности поля существенно нелинейна. Поэтому при амплитудной модуляции возникнут высшие гармоники $2\Omega p$, амплитуда которых определяется функциями Бесселя первого рода p -го порядка. Применив ко второму множителю модулированного исходящего сигнала разложение в ряд по функциям Бесселя получим:

$$E_{AM}(t) = 2E_0 \sum_{k=0}^{\infty} J_{2k+1}\left(\frac{\Gamma_0}{2}\right) \sin((2k+1)\Omega t) \cos \omega t. \quad (5)$$

Отражение от m -го датчика модулированного сигнала $E_{AM}(t)$ будет означать прибавку δt_m к фазе колебаний ($\delta t_m = 2nL_m / c$ – время прохождения в обе стороны между модулятором и m -ой решеткой), а уровень сигнала получит мультипликативный множитель коэффициента отражения m -ой решетки R_m , то есть, обратный отраженный от ВБР сигнал будет иметь вид:

$$E_{Bm}(t) = 2E_0 R_m \sum_{k=0}^{\infty} J_{2k+1}\left(\frac{\Gamma_0}{2}\right) \times \sin((2k+1)\Omega(t + \delta t_m)) \cos \omega t. \quad (6)$$

Как показано в [55], можно подобрать такие условия параметров модуляции, что для функций Бесселя будут справедливы соотношения:

$$J_1\left(\frac{\Gamma_0}{2}\right) \gg J_{2k+1}\left(\frac{\Gamma_0}{2}\right), \quad \forall k \geq 1. \quad (7)$$

В этих условиях, запись отраженного сигнала можно упростить, оставив в соотношении (6) только первое слагаемое. Тогда соотношение для (6) примет вид:

$$E_{Bm}(t) = 2E_0 R_m J_1\left(\frac{\Gamma_0}{2}\right) \sin(\Omega(t + \delta t_m)) \cos \omega t. \quad (8)$$

Таким образом, выражение (8) описывает сигнал, прошедший путь от лазера через нижнее плечо интерферометра (через модулятор Маха – Цандера) и, отразившись от массива решеток, вернувшееся по верхнему плечу интерферометра на каплер K_3 . Причем боковые составляющие распространяются по одному волокну и содержат в своем амплитудно-фазовом отклике информацию о датчиках.

Рассмотрим первый случай, когда оптическое излучение от лазера проходит по верхнему плечу интерферометра Маха – Цандера.

Применим ту же логику рассуждений к получению отраженного сигнала от несущей частоты. Отраженный от m -ой решетки сигнал с несущей частотой и прошедший через нижнее плечо (через модулятор Маха – Цандера) будет иметь вид:

$$E_{Cm}(t) = 2E_0 R_m \sum_{k=0}^{\infty} J_{2k+1}\left(\frac{\Gamma_0}{2}\right) \times \sin((2k+1)\Omega t) \cos(\omega(t + \delta t_m)). \quad (9)$$

Для нее так же справедливо условие (7), и соотношение (9) может быть переписано в следующем виде:

$$E_{Cm}(t) = 2E_0 R_m J_1\left(\frac{\Gamma_0}{2}\right) \sin(\Omega t) \cos(\omega(t + \delta t_m)). \quad (10)$$

В соотношении (10) величиной задержки по времени можно пренебречь, поскольку:

$$\cos(\omega(t + \delta t_m)) = \cos(\omega t) \cos(\delta t_m) - \sin(\omega t) \sin(\delta t_m). \quad (11)$$

Величина δt_m очень мала, следовательно $\sin(\delta t_m) \approx 0$, а $\cos(\delta t_m) \approx 1$, и для (10), с учетом (11), справедливо:

$$E_{Cm}(t) = 2E_0 R_m J_1\left(\frac{\Gamma_0}{2}\right) \sin(\Omega t) \cos(\omega t). \quad (12)$$

Таким образом, выражение (12) описывает сигнал, прошедший путь от лазера через верхнее плечо интерферометра и, отразившись от массива решеток, вернувшееся по нижнему плечу

интерферометра (через модулятор Маха – Цандера) на каплер K_3 .

Общий суммарный сигнал, поступающий на низкочастотный фотодетектор (ширина полосы пропускания $\ll \Omega$) будет результатом интерференции волн отражения от m -ой решетки:

$$E_{PDm}(t) = \left\langle (E_{Bm}(t) + E_{Cm}(t))^2 \right\rangle. \quad (13)$$

В итоге, после исключения квадратичных составляющих, суммарный ток на фотодетекторе будет пропорционален

$$E_{PDm}(t) \propto DC + 8E_0^2 R_m^2 J_1^2 \left(\frac{\Gamma_0}{2} \right) \times \sin(\Omega(t + \delta t_m)) \sin(\Omega t) \cos^2(\omega t). \quad (14)$$

После ряда несложных математических преобразований получим:

$$E_{PDm}(t) \propto DC + 4E_0^2 R_m^2 J_1^2 \left(\frac{\Gamma_0}{2} \right) \times (1 - \cos(2\omega t)) (\cos(\Omega \delta t_m) - \cos(2\Omega t + \delta t_m)). \quad (15)$$

Слагаемые с удвоенной частотой 2Ω в частотный диапазон низкочастотного фотодетектора не попадают, и выражение (15) принимает окончательный вид, после очередного переопределения постоянной составляющей DC :

$$E_{PDm}(t) \propto DC + 4E_0^2 R_m^2 J_1^2 \left(\frac{\Gamma_0}{2} \right) \cos(\Omega \delta t_m). \quad (16)$$

В итоге, суммарный ток на фотодетекторе при получении отражений от всех датчиков в системе получит вид, где во множителе H_m вошли все постоянные коэффициенты из (16):

$$I(\Omega) \propto DC + \sum_m H_i \cos\left(\frac{2nL_m}{c} \Omega\right) = DC + H_m \cos(2\pi F_m \Omega). \quad (17)$$

Если менять частоту зондирования радиочастотного сигнала Ω линейно, то результирующий выходной сигнал превращается в сумму синусоидальных функций от Ω , каждая из которых имеет свою «частоту» $F_m = 2nL_m / c$, и эта «частота» несет в себе информацию о местоположении m -ой решетки. Если применить к результирующему сигналу $I(\Omega)$ быстрое преобразование Фурье (БПФ) по Ω , то в качестве результата получим главные «частоты» F_m и их амплитуды H_m разложения $I(\Omega)$ по Ω . Для этого будем линейно изменять значение Ω , а дискретный шаг изменения, выберем так, чтобы общее количество точек изменения Ω было равным степени двойки. В этом случае, применив БПФ получим

F_m и их амплитуды H_m для каждого датчика. Зная значения F_m , можно вычислить расстояние $L_m = F_m c / 2n$ до m -ой решетки.

Выше была проанализирована работа РДИ ИССЧ с одночастным источником зондирующего излучения. Однако комбгенератор КГ формирует гребенку частот ω_i . Излучение КГ можно представить в виде суммы узкополосных спектральных составляющих:

$$E_{in}(t) = \sum_i E_{\omega_i}(t) = \sum_i E_{0\omega_i} \cos(2\pi\omega_i t + \varphi_{\omega_i}), \quad (18)$$

где ω_i , φ_{ω_i} и $E_{0\omega_i}$ – частота, фаза и амплитуда i -ой спектральной составляющей.

При этом примем, что фаза $E_{\omega_i}(t)$ не зависит от времени для получения максимально узкой спектральной составляющей, что практически реализуется в КГ на основе амплитудно-фазового преобразования оптической несущей с узкой шириной линии излучения (десятки кГц – единицы МГц). Полоса генерации и число составляющих КГ выбирается из условий динамического диапазона измерений, определяемое диапазоном сдвига центральной длины волны ВБР. Следует заметить, что решетки не входящие в зону зондирования боковых составляющих ($\omega_i - \Omega$) и ($\omega_i + \Omega$) 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 компонент ($\omega_i - \Omega$) и ($\omega_i + \Omega$), то точность восстановления спектра повышается.

Пространственное разрешение δL РДИ ИССЧ определяется диапазоном перестройки Δ радиочастотного сигнала $\delta L = c/2n\Delta$. Расстояние между модулятором и m -ой решеткой, удаленной на L_m , пропорционально частоте интерференционного сигнала F_m . Согласно теореме Котельникова, частота дискретизации должна быть больше $2F_m$. Шаг перестройки должен определяться выражением $1/f_{step} \geq 2F_m = 4nL_m/c$.

Таким образом, максимальный диапазон измерения равен:

$$L_{max} = c/4nf_{step}. \quad (19)$$

Решение задачи восстановления спектра ВБР может быть сведено к решению задачи его ха-

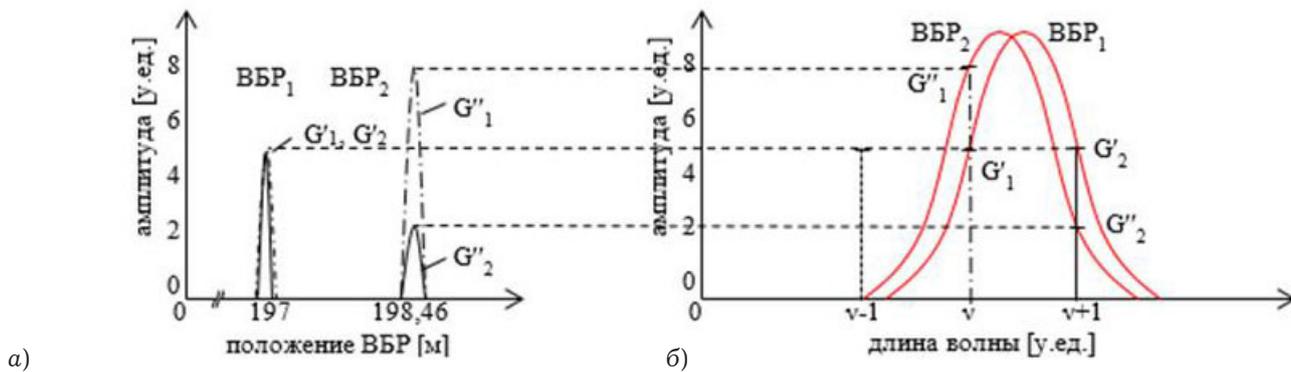


Рис. 2. Группа из двух однотипных ВБР: коэффициент отражения (а) для разных частот КГ ω и $\omega + 1$ и восстановленные спектры (б) решеток

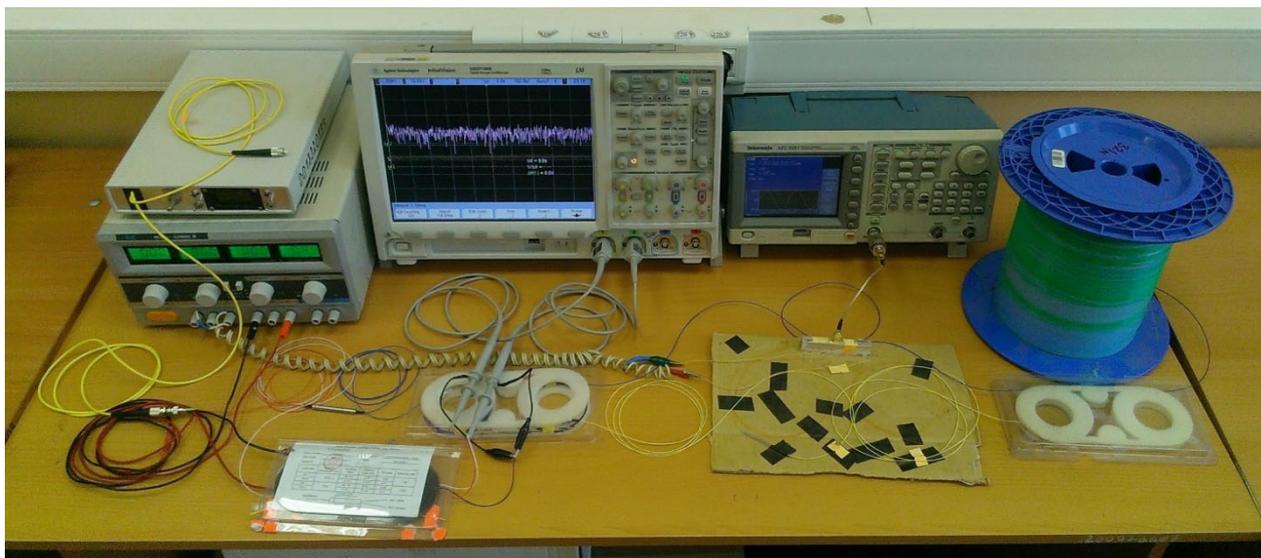


Рис. 3. Экспериментальная установка для исследования РДИ ИССЧ

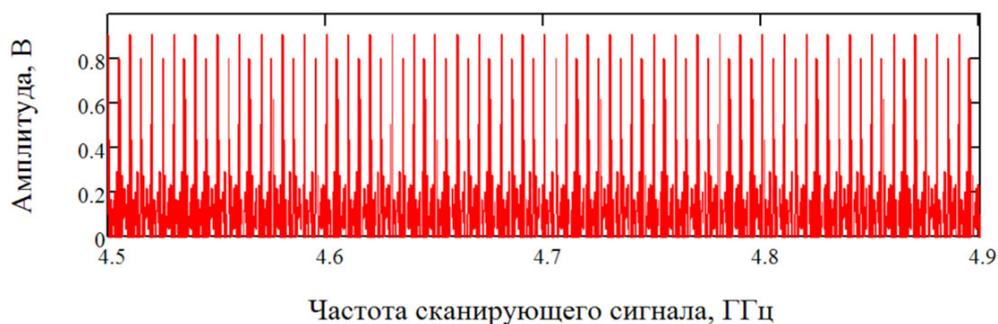


Рис. 4. Сигнал на выходе фотоприемника

рактизации при двухчастотном зондировании [55]. Как известно, для эффективного двухчастотного зондирования необходима разностная частота, равная полуширине исследуемой ВБР. Такой разнос можно получить при перестройке частоты Ω в диапазоне 10–30 ГГц, однако, в этом случае ограничение накладывает различие модуляционных свойств АМ в прямом и обратном направлении. Поэтому, наиболее простым вариантом такой реализации метода может быть использование КГ, разность частот которого ω и

$\omega + 1$ удовлетворяет указанному выше диапазону 10–30 ГГц.

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

Экспериментальная установка для отработки РДИ ИССЧ, представлена на рис. 3. Массив решеток записан на волокне, намотанном на бобину.

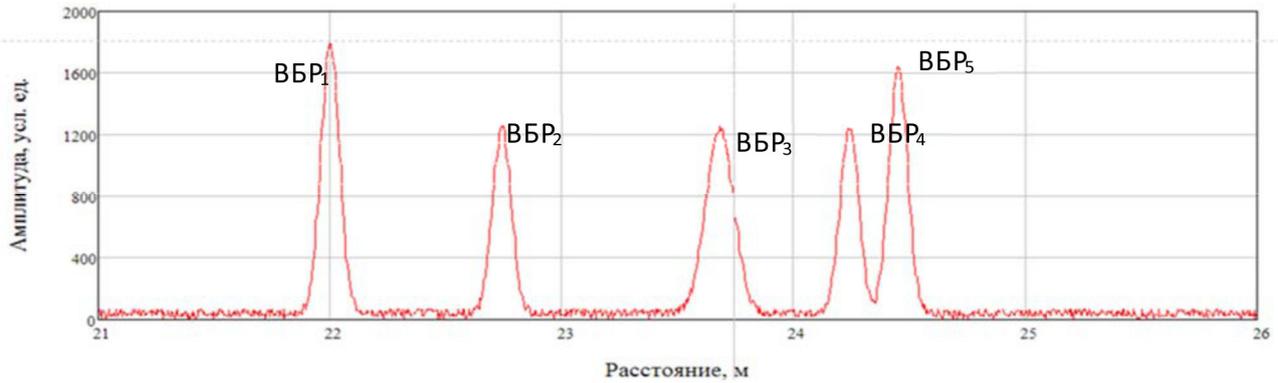


Рис. 5. Фурье-спектр сигнала на выходе фотоприемника в исходном состоянии ВБР

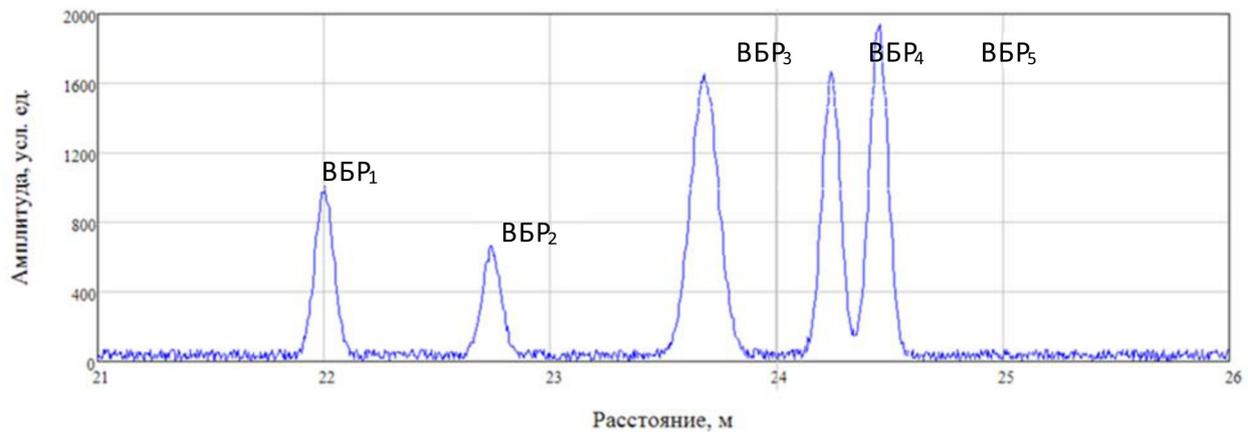


Рис. 6. Фурье-спектр сигнала на выходе фотоприемника в возмущенном состоянии ВБР: центральная длина волны ВБР₁ и ВБР₂ смещена влево (сжатие, охлаждение), ВБР₃–ВБР₅ – вправо (натяжение, нагрев)

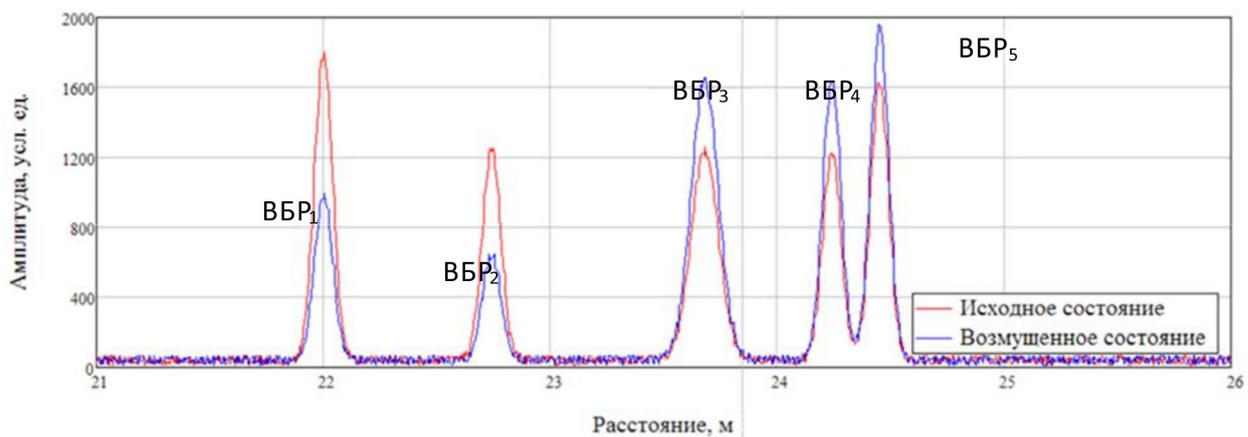


Рис. 7. Совмещенный график Фурье-спектров до и после возмущения

На рис. 4 показан сигнал с выхода одного из фотоприемников ФД, виден на осциллографе (рис. 3).

Применим синус-преобразование Фурье к данному сигналу:

$$F(l) = \int_0^{\infty} I(f) \sin(2\pi fl) df. \quad (20)$$

Получаем следующее расположение решеток и соответствующих им коэффициентов отражения до и после возмущения (рис. 5–7).

Высокое пространственное разрешение и больший диапазон измерений может быть достигнут увеличением частоты сканирования и подбором 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 глав-

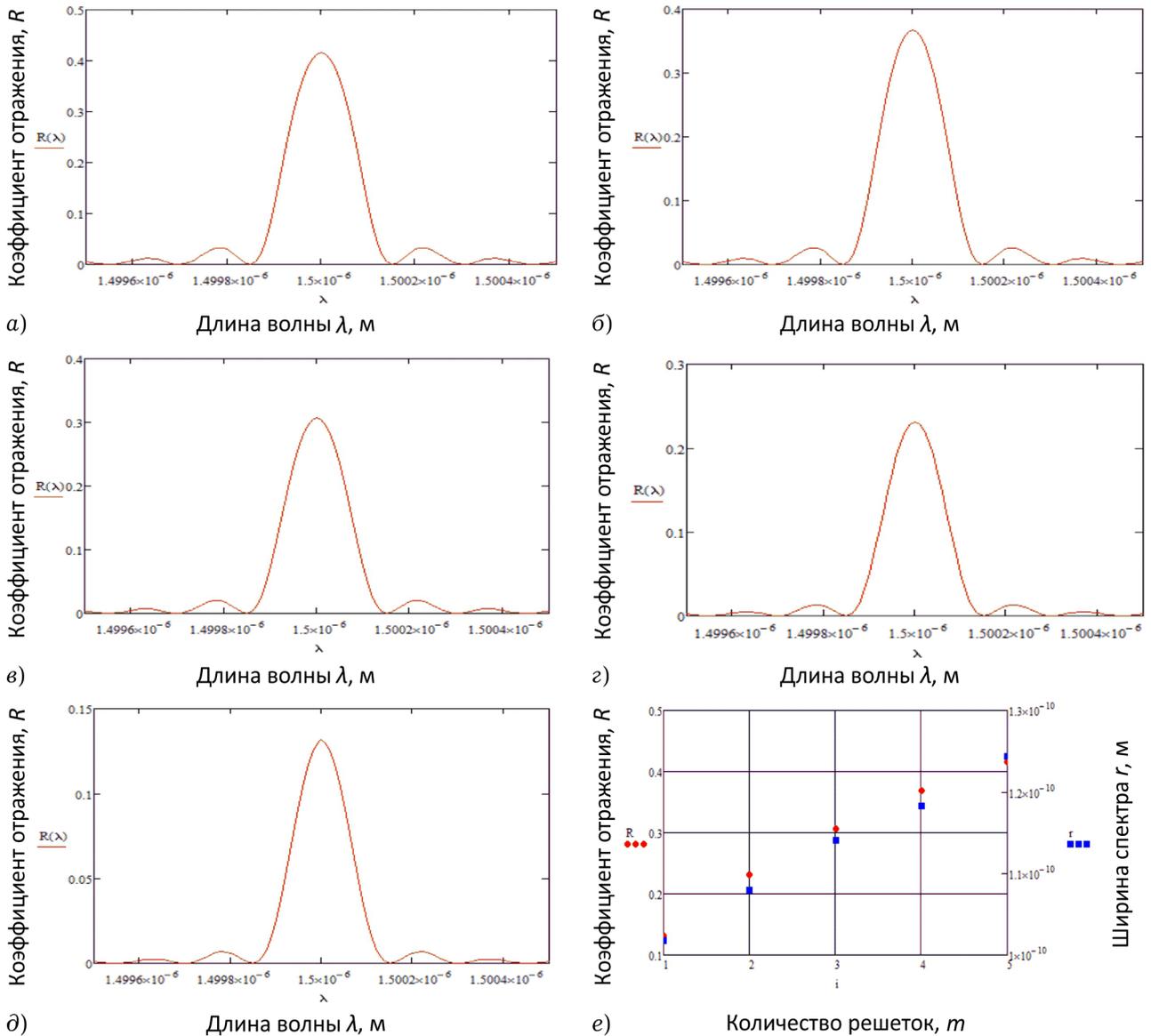


Рис. 8. Огибающая спектра $R(\lambda)$ для пяти (а), четырех (б), трех (в), двух (г), одной (д) однопериодных ВБР и зависимость изменения коэффициента отражения R и ширины спектра r по уровню 3 дБ для общего спектра решеток от их количества m (е)



Рис. 9. Спектр отражения одной решетки



Рис. 10. Спектр отражения двух решеток

ный 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.

Экспериментально получены близкие к [47] результаты – при мощности источника в 5–8 мВт, можно детектировать датчики с разрешением по коэффициенту отражения менее 0,1 % и динамическим диапазоном по отражению 10–20 дБ.

3. Принципы построения радиофотонного двухчастотного интеррогатора на основе способа вариации разностной частоты

Рассмотрим работу радиофотонного двухчастотного интеррогатора на основе способа вариации разностной частоты (РДИ СВРЧ) и результаты модельного физического эксперимента для «вертикального» разрешения ВБР в группе с изменяемым количеством решеток.

Огибающую спектра для m -ой слабоотражающей ВБР можно определить, как:

$$I_{tm}(\lambda) = (1 - R(\lambda))^{2(m-1)} R(\lambda) I_0(\lambda), \quad (21)$$

где $R(\lambda)$ – коэффициент отражения решетки; m – номер решетки в группе; $I_0(\lambda)$ – спектральная интенсивность источника излучения. Изменение фактора m при изменении общей длины ВБР (происходит «стирание» решеток) приводит к изменению «общей» ширины спектра ВБР в (21) – частотный параметр измерений,

а также к изменению величины коэффициента отражения $R(\lambda)$ – амплитудный параметр измерений.

Поправка на профиль решетки, вызванная переотражениями высшего порядка от двух предыдущих решеток, будет определяться как:

$$C_m(\lambda) = \frac{(m-1)(m-2)}{2} R^3(\lambda) \times (1 - R(\lambda))^{2(m-2)} I_0(\lambda), \quad (22)$$

при $m \geq 3$.

Описанные в (21)–(22) зависимости брэгговской структуры были использованы нами для моделирования измерительных характеристик датчика износа из пяти ВБР 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 одной ВБР при износе четырех первых (рис. 8).

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.

На рис. 8 показаны огибающие спектра $R(\lambda)$ для пяти (а), четырех (б), трех (в), двух (г), одной (д) однотипных ВБР и зависимость изменения коэффициента отражения R и ширины спектра r по уровню 3 дБ для общего спектра решеток от их количества m (е).

На рис. 9–11 показан интегральный коэффициент отражения группы из одной (рис. 9),



Рис. 11. Спектр отражения трех решеток

двух (рис. 10) и трех (рис. 11) слабоотражающих однотипных решеток (10 %), расположенных в одномодовом волокне SMF-28 с расстоянием между решетками 0,38 м. Массив записан на установке научно-исследовательского института прикладной электродинамики, фотоники и живых систем КНИТУ-КАИ для записи ВБР (изготовитель НГУ, Новосибирск).

Анализ рис. 8–11 позволил синтезировать способ определения числа ВБР в последовательности, а, соответственно, и уровня износа щетки, основанный на определении силы решеток – добротности общего контура для огибающей спектра последовательно установленных гауссовских 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 [60], основанный на соотношении:

$$Q_{1,2} = \frac{v_{FBG}}{f_1 - f_2} \sqrt{\frac{i_{out(v_{FBG})}}{i_{out1,2}} - 1}, \quad (23)$$

где $i_{out(v_{FBG})}$ и $i_{out1,2}$ – амплитуды максимума огибающей спектра и компонент двухчастотного излучения на выходе фотоприемника, когда средняя частота составляющих f_1 и f_2 настроена на центр спектральной характеристики. Значения $i_{out1,2}$ определяются по выходным сигналам фотоприемника, параметр $i_{out(v_{FBG})}$ не известен. Если изменить $\Delta f = f_1 - f_2$ на некоторую величину $\Delta f'$, не меняя положения зондирующего излу-

чения 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 (23) как

$$Q_{3,4} = \frac{v_{FBG}}{f_3 - f_4} \sqrt{\frac{i_{out(v_{FBG})}}{i_{3,4}} - 1}. \quad (24)$$

Поскольку $Q_{1,2} = Q_{3,4}$, путем совместного решения уравнений (23) и (24) получим $i_{out(v_{FBG})}$. Затем, подставляя это значение в любое из выражений, получим значение максимума огибающей спектра, на основании чего будет определена величина износа или количество ВБР. Можно заметить, что при большем коэффициенте отражения, задача решается более информативно, хотя число решеток в последовательности уменьшается.

В [51–54] 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 уширение спектра на определенном зафиксированном уровне. В первом случае погрешность измерения будет определяться

величиной младшего разряда АЦП в системе регистрации. Во втором случае – эта величина будет определяться погрешностью интеррогатора. В обоих случаях достижимо измерение величины износа в десятые доли микрон.

Заключение

1. На основе результатов анализа современного состояния подсистем комплексированных ВОД, способов их интеррогации и мультиплексирования развито понятие единого поля комплексированных ВОД, в структуру которого включены последовательные группы однотипных ВБР. Как наиболее важная, поставлена задача развития радиофотонных способов их двухчастотного зондирования для построения универсальных и стандартизированных интеррогаторов, позволяющих разрешить каждую из решеток в группе.

2. Представлены принципы работы, оценка метрологических характеристик и варианты реализации радиофотонных способов зондирования группы однотипных ВБР в интеррогаторах на основе интерферометрии со смещением частоты. Впервые показана возможность применения в них двухчастотных зондирующих излучений, полученных с помощью радиочастотного модуляционного амплитудно-фазового преобразования оптической несущей. Определены перспективы применения указанного способа в структуре ВОСС, отвечающих требованию минимизации структуры по числу каналов и датчиков при различных вариантах волнового и частотного мультиплексирования.

3. Предложены радиофотонные двухчастотные способы зондирования последовательности однотипных ВБР с изменяющимся числом датчиков в группе на основе способа вариации разностной частоты. Представлены принципы работы, оценка метрологических характеристик и варианты реализации радиофотонных способов зондирования при дискретном исключении последней из решеток. Определены перспективы применения указанного способа в структуре ВОСС для мониторинга щеточно-коллекторных узлов электродвигателей и других механических систем контроля износа и трения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках государственного задания на оказание услуг (выполнение работ) по организации научных исследований, выполняемых Казанским национальным исследователь-

ским техническим университетом на кафедре радиофотоники и микроволновых технологий и в научно-исследовательском институте прикладной электродинамики, фотоники и живых систем (программа «Радиофотоника» З.1962.2014/К).

Список литературы

1. An interrogator for a fiber Bragg sensor array based on a tunable erbium fiber laser / S.A. Babin [et al.] // *Laser Physics*. 2007. Vol. 17. № 11. P. 1340–1344.
2. Application of optical time-domain reflectometry for the interrogation of fiber Bragg sensors / Yu.N. Kulchin [et al.] // *Laser Physics*. 2007. Vol. 17. № 11. P. 1335–1339.
3. Combined time-wavelength interrogation of fiber-Bragg gratings based on an optical time-domain reflectometry / Yu.N. Kulchin [et al.] // *Laser Physics*. 2008. Vol. 18. № 11. P. 1301–1304.
4. Differential reflectometry of FBG sensors in the wide spectral range / Yu.N. Kulchin [et al.] // *Laser Physics*. 2011. Vol. 21. № 2. P. 304–307.
5. Niewczas O.P. High-speed, solid state, interferometric interrogator and multiplexer for fiber Bragg grating sensors // *J. Lightwave Technol.* 2011. Vol. 29. P. 3387–3392.
6. Kersey A.D., Berkoff T.A., Morey W.W. Multiplexed fiber Bragg grating strain-sensor system with a fiber Fabry-Perot wavelength filter // *Opt. Lett.* 1993. Vol. 18. P. 1370–1372.
7. A large capacity sensing network with identical weak fiber Bragg gratings multiplexing / M. Zhang [et al.] // *Opt. Commun.* 2012. Vol. 285. P. 3082–3087.
8. Use of 3000 Bragg grating strain sensors distributed on four 8 m optical fibers during static load tests of a composite structure / A. Childers [et al.] // *Proc. of SPIE*. 2001. Vol. 4332. P. 133–142.
9. Using frequency-shifted interferometry for multiplexing a fiber Bragg grating array / F. Ye [et al.] // *IEEE Photon. Technol. Lett.* 2008. Vol. 20. P. 1488–1490.
10. Multiplexing of fiber Bragg grating sensors using an FMCW technique / P.K.C. Chan [et al.] // *IEEE Photon. Technol. Lett.* 1999. Vol. 11. P. 1470–1472.
11. Zheng J. Analysis of optical frequency-modulated continuous-wave interference // *Appl. Opt.* 2004. Vol. 43. P. 4189–4198.
12. Kajiwara K., Hotate K. Multiplexing of long-length fiber Bragg grating distributed sensors based on synthesis of optical coherence function // *IEEE Photon. Technol. Lett.* 2011. Vol. 23. P. 1555–1557.
13. Волоконно-оптические технологии в распределенных системах экологического мониторинга / В.Г. Куприянов [и др.] // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2011. Т. 13(34). № 4(4). С. 1087–1091.

14. Optical frequency domain reflectometry with a narrow linewidth fiber laser / P. Oberson [et al.] // *IEEE Photonics technology letters*. 2000. Vol. 12. № 7. P. 867–869.
15. Ybksel K., Wuilpart M., Mйгret P. Optical-frequency domain reflectometry: roadmap for high-resolution distributed measurements // *Proc. Symposium IEEE/LEOS (Benelux Chapter)*. 2007. P. 2301–2305.
16. High resolution optical frequency domain reflectometry for characterization of components and assemblies / B.J. Soller [et al.] // *Optics Express*. 2005. Vol. 13. P. 666–674.
17. Millimeter resolution reflectometry over two kilometers / D.K. Gifford [et al.] // *Proc. of the ECOC*. 2007. P. 03.6.1–1569045406.
18. Distributed beatlength measurement in single-mode fibers with OFDR / M. Wegmuller [et al.] // *J. of Lightw. Technol.* 2002. Vol. 20. P. 828–835.
19. Optical fiber locator by the step frequency method / J. Nakayama [et al.] // *Applied Optics*. 1987. Vol. 26. P. 440–443.
20. 5-mm-resolution OFDR using a coded phase-reversal modulator / D.W. Dolfi [et al.] // *Optics Letters*. 1988. Vol. 13. P. 678–680.
21. MacDonald R.I. Frequency domain optical reflectometer // *Applied Optics*. 1981. Vol. 20. P. 1840–1844.
22. Narrow linewidth fiber laser for 100-km optical frequency domain reflectometry / J. Geng [et al.] // *Photonics Technology Lett.* 2005. Vol. 17. P. 1827–1829.
23. Sorin W.V. Optical Reflectometry for component characterization // *Fiber optic test and measurements*. 1991. P. 425–431.
24. Distributed strain measurement with high spatial resolution using fiber Bragg gratings and optical frequency domain reflectometry / H. Murayama [et al.] // *OSA/OFS*. 2006. P. ThE40.
25. Jiang Qi, Rao Yun-Jiang, De-Hong Zeng. A fiber-optical intrusion alarm system based on quasi-distributed fiber Bragg grating sensors // *APOS*. 2008. P. 1–5.
26. Wu Qi, Okabe Yoji. Novel real-time acousto-ultrasonic sensors using two phase-shifted fiber Bragg gratings // *J. of Int. Mat. Systems and Structures*. 2013. Vol. 31. P. 51–56.
27. Пат. 122174 Российская Федерация. Устройство для измерения параметров физических полей / П.Е. Денисенко [и др.] // *Бюл.* № 32. 2012. 2 с.
28. Морозов О.Г., Ильин Г.И. Амплитудно-фазовая модуляция в системах радиофотоники // *Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы*. 2014. № 1 (20). С. 6–42.
29. Морозов, О.Г., Айбатов Д.Л., Садеев Т.С. Синтез двухчастотного излучения и его применение в волоконно-оптических системах распределенных и мультиплексированных измерений // *Физика волновых процессов и радиотехнические системы*. 2010. Т. 13. № 3. С. 84–91.
30. Метод формирования двухчастотного излучения для синтеза солитонов и применения спектрально-эффективной модуляции RZ и CSRZ форматов в оптических сетях доступа / А.А. Талипов [и др.] // *Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы*. 2012. № 2 (16). С. 3–12.
31. Ильин, Г.И., Морозов О.Г., Польский Ю.Е. ЛЧМ-лидар с преобразованием частоты // *Оптика атмосферы и океана*. 1995. Т. 8. № 12. С. 1871–1874.
32. Айбатов Д.Л., Морозов О.Г., Садеев Т.С. Преобразование спектра оптического излучения в двухканальном модуляторе Маха – Цендера и ROF-фильтр на его основе // *Нелинейный мир*. 2010. Т. 8. № 5. С. 302–309.
33. 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.
34. Амплитудно-фазовые методы формирования зондирующих излучений для систем анализа волоконно-оптических структур / О.Г. Морозов [и др.] // *Физика волновых процессов и радиотехнические системы*. 2007. Т. 10. № 3. С. 119–124.
35. Оптико-электронные системы измерения мгновенной частоты радиосигналов с амплитудно-фазовым модуляционным преобразованием оптической несущей / О.Г. Морозов [и др.] // *Прикладная фотоника*. 2014. № 2. С. 5–23.
36. Измерение мгновенной частоты с помощью двухчастотного зондирования / О.Г. Морозов [и др.] // *Научно-технический вестник Поволжья*. 2012. № 4. С. 146–149.
37. Измерение мгновенной частоты СВЧ-радиосигналов в оптическом диапазоне на основе преобразования «частота-амплитуда» в волоконной решетке Брэгга с фазовым π -сдвигом / О.Г. Морозов [и др.] // *Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы*. 2013. № 3. С. 30–41.
38. Морозов О.Г., Польский Ю.Е. Единое поле комплексированных ВОД в системах контроля параметров безопасности скоростных транспортных средств // *Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева*. 1997. № 4. С. 27.
39. Метод исключения для расчета распространения волн через среды со ступенчатыми неоднородностями / И.В. Антонец [и др.] // *Журнал радиоэлектроники*. 2013. № 4. С. 1–38.
40. Reflectometry based on a frequency-shifted interferometer using sideband interference / B. Qi [et al.] // *Opt. Lett.* 2013. Vol. 38. P. 1083–1085.
41. Large-capacity multiplexing of near-identical weak fiber Bragg gratings using frequency shifted interferometry / Y Ou [et al.] // *Opt. Express*. 2015. Vol. 23. P. 31484–31495.
42. High-resolution, large dynamic range fiber length measurement based on a frequency-shifted asymmetric

- Sagnac interferometer / B. Qi [et al.] // Opt. Lett. 2005. Vol. 30. P. 3287–3289.
43. Frequency-shifted Mach-Zehnder interferometer for locating multiple weak reflections along a fiber link / B. Qi [et al.] // IEEE Photon. Technol. Lett. 2006. Vol. 18. P. 295–297.
44. Multipoint sensing with a low-coherence source using single-arm frequency-shifted interferometry / Y. Zhang [et al.] // Applied Optics. 2016. Vol. 55. № 21. P. 5526–5530.
45. Wild G., Hinckley S. An intensimetric detection system for fibre Bragg grating sensors // Proc. OECC/ACOFT. 2008. P. 1–2.
46. El-Diasty F., Heaney A., Erdogan T. Analysis of fiber Bragg gratings by a side diffraction interference technique // Applied Optics. 2001. Vol. 40. № 6. P. 8909–8916.
47. Phase-sensitive interrogation of fiber Bragg grating resonators for sensing applications / J.H. Chow [et al.] // J. of Light. Tech. 2005. Vol. 23. № 5. P. 1881–1889.
48. Study of local properties of fibre Bragg gratings by the method of optical space-domain reflectometry / I.G. Korolev [et al.] // Quantum Electronics. 2003. № 33(8). P. 704–710.
49. Aibatov D.L., Morozov O.G. Two-frequency scanning of FBG with arbitrary reflection spectrum // Proc. of SPIE. 2007. Vol. 6605. P. 660506.
50. Авторское свидетельство 1338647 СССР. Способ преобразования одночастотного когерентного излучения в двухчастотное / Ильин Г.И., Морозов О.Г. // Бюл. № 20. 2004. 2 с.
51. Кузнецов А.А. Комплексированный волоконно-оптический датчик износа и температуры трущихся поверхностей // Научно-технический вестник Поволжья. 2016. № 1. С. 45–48.
52. Щетка как интеллектуальный узел электродвигателя / О.Г. Морозов [и др.] // Инженерный вестник Дона (электронный научный журнал). 2016. № 1. URL: ivdon.ru/rumagazine/archive/n1y2016/3525.
53. Smart photonic carbon brush / O.G. Morozov [et al.] // Proc. of SPIE. 2016. Vol. 9807. P. 98070M.
54. Датчик износа и температуры изделия на основе волоконно-оптического чувствительного элемента / А.А. Кузнецов [и др.] // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2015. Т. 17. № 6(2). С. 455–460.
55. Определение характеристик спектра усиления Манделштама – Бриллюэна с помощью двухчастотного зондирующего излучения / О.Г. Морозов [и др.] // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2012. Т. 15. № 3. С. 95–100.
56. Структурная минимизация волоконно-оптических сенсорных сетей экологического мониторинга / В.В. Куревин [и др.] // Инфокоммуникационные технологии. 2009. Т. 7. № 3. С. 46–52.
57. Маломодовое зондирование датчиков на основе волоконных решеток Брэгга / В.Г. Куприянов [и др.] // Научно-технический вестник Поволжья. 2013. № 4. С. 322–325.
58. Волоконные решетки Брэгга с фазированной структурой в распределенных информационно-измерительных системах / С.Г. Алюшина [и др.] // Нелинейный мир. 2011. Т. 9. № 8. С. 522–528.
59. Функционально адаптивные СВЧ-технологии в задачах переработки термопластичных полимерных материалов / Г.А. Морозов [и др.] // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2011. № 3. С. 13–24.
60. Двухчастотный метод определения параметров резонансных датчиков СВЧ-диапазона / О.Г. Морозов [и др.] // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2014. № 1 (20). С. 76–86.

Radiophotonics two-frequency methods for interrogation of similar fiber Bragg gratings, united to the group

*O.G. Morozov, G.A. Morozov, I.I. Nureev,
A.J. Sakhabutdinov, V.I. Artem'ev*

The article presents the operating principles, evaluation of metrological characteristics and embodiments for microwave photonics probing of similar FBG interrogator based on frequency shift interferometry and variation of difference frequencies. It is shown, for the first time, the possibility of using them in dual-frequency probing radiation format, when latter received via microwave amplitude-phase conversion of the optical carrier by the Il'in-Morozov's method. The prospects of these methods use in the structure of the fiber-optic sensor-networks are discussed.

Keywords: microwave photonics, optical carrier, amplitude-phase modulation, dual-frequency probing, fiber Bragg grating, frequency shift interferometry, method of difference frequency variation.