

Многоадресные волоконные брэгговские структуры в радиофотонных сенсорных системах

Т.А. Аглиуллин¹, В.И. Анфиногентов¹, Р.Ш. Мисбахов², О.Г. Морозов¹,
А.Ж. Сахабутдинов^{1*}

¹Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева,
Казань, 420111, Российская Федерация

²Казанский Государственный энергетический университет,
Казань, 420066, Российская Федерация

*Адрес для переписки: azhsakhabutdinov@kai.ru, energy@zerdex.pro

Информация о статье

Поступила в редакцию 28.02.2020

Принята к публикации 11.03.2020

Ссылка для цитирования: Аглиуллин Т.А., Анфиногентов В.И., Мисбахов Р.Ш., Морозов О.Г., Сахабутдинов А.Ж. Многоадресные волоконные брэгговские структуры в радиофотонных сенсорных системах // Труды учебных заведений связи. 2020. Т. 6. № 1. С. 6–13. DOI:10.31854/1813-324X-2020-6-1-6-13

Аннотация: В статье изложена концепция перехода от адресных волоконных брэгговских структур (и радиофотонных сенсорных систем на их основе) к многоадресным структурам, отличие которых от адресных заключается в том, что в волоконной брэгговской структуре формируется три и более сверх узкополосных частотных составляющих, разнесенных между собой на радиочастоту. Определение смещения центральных частот осуществляется по результату обработки сигнала биений оптических частот на фотоприемнике, по параметрам которых судят о приложенных физических полях. Поставлена и решена задача однозначного определения сдвига центральной (брэгговской) частоты многоадресной волоконной брэгговской структуры с уникальным набором адресных частот.

Ключевые слова: радиофотонные сенсорные системы, волоконные решетки Брэгга, адресные и многоадресные волоконные брэгговские структуры.

Введение

Общей проблемой опроса массива волоконных брэгговских решеток (ВБР) в сенсорных системах является сложность и дороговизна используемых приборов, обусловленная применяемыми технологиями опроса и мультиплексирования датчиков [1–5]. Волновое [1], временное [2], частотное [3], поляризационное [4] и пространственное [5] мультиплексирование требует применения таких сложных устройств, как оптические анализаторы спектра, спектрометры с перестраиваемыми интерферометрами Фабри – Перо с дифракционными решетками, излучение которых принимается и анализируется на ПЗС-матрицах и т. д. Сложность применяемых технологий мультиплексирования и опроса объясняется и еще одним важным фактором – опрашиваемые датчики не являются адресными, поэтому любое перекрытие спектров ВБС приводит к существенным ошибкам измерений [6–8].

Параллельно с развитием технологий мультиплексирования и методов радиофотонного опроса

развивались и методы создания спектрально-кодированных ВБР, информация о спектральной форме которых позволяет обеспечить разделение откликов от ВБР-датчиков, работающих в одном и том же частотном диапазоне [9–12]. Спектрально кодированные датчики основаны на технологии кодового мультиплексирования [11–12], опрос которых производится в режиме реального времени с помощью определения функции автокорреляции между отраженным от датчика спектром и его кодовой сигнатурой. В ряде работ продемонстрировано обнаружение и отслеживание датчиков для эффективного измерения температуры и деформации даже в условиях перекрытия спектров датчиков при использовании кодов Слепьяна на основе ортогональных дискретных протяженных сфероидальных последовательностей [13–16].

Более простое решение найдено в использовании адресных волоконных брэгговских структур (АВБС), таких квазипериодических структур в оптическом волокне, которые при направлении на

них широкополосного лазерного излучения с равномерной амплитудно-частотной характеристикой формируют в оптическом диапазоне двухчастотный сигнал, разность между частотами которого много меньше несущих оптических частот и находится в радиочастотной области спектра. Разностная частота между двумя частотными составляющими называется адресной частотой. Такая частота инвариантна к воздействию внешних физических полей и не меняется при смещении центральной частоты АББС [17]. Адресные волоконные брэгговские структуры одновременно являются и формирователем двухчастотного излучения (за счет включения в их структуру оптических частотных составляющих, разнесенных на радиочастоту) и чувствительным элементом измерительных систем (за счет того, что разностная частота между оптическими составляющими инвариантна к контролируемым физическим полям), которые позволяют строить распределенные сенсорные системы с большим количеством датчиков без сложных оптико-электронных схем (за счет того, что набор разностных частот датчиков в массиве взаимно ортогонален) [17, 18].

Закономерным является переход от АББС к многоадресной структуре, в спектральном отклике которой сформированы три (и более) оптических частотных компоненты, перекрестные биеения которых на фотоприемнике формируют сложный, комбинированный адрес такой брэгговской структуры, состоящий из трех (и более) адресных частот. Такая их комбинация позволяет не только расширить адресную емкость измерительной системы, но и повысить точность определения центральной частоты отдельной многоадресной брэгговской структуры.

Многоадресная волоконная брэгговская структура

Многоадресная волоконная брэгговская структура (МABBС) – это такая квазипериодическая структура, сформированная в сердцевине оптического волокна, спектральный отклик от которой в оптическом диапазоне представляет собой трех- (и/или более) частотный сигнал, локализованный в узкой части спектра, разностные частоты между которыми много меньше (на три и более порядка) несущих оптических частот и находятся в радиочастотной области спектра. Характерной особенностью МABBС, как и АББС, является инвариантность адресных частот при наложении на них деформационных или температурных полей [17], что позволяет использовать их в качестве чувствительных элементов измерительных систем.

Существует как минимум два подхода к формированию АББС и МABBС – это внесение в периодическую структуру ВБР нескольких фазовых п-сдвигов [19] и формирование ВБС из набора сверхузкополосных ВБР [17].

Чтобы МABBС можно было использовать в качестве чувствительного элемента радиофотонных сенсорных систем, необходимо потребовать выполнения дополнительного условия, а именно – в область анализа светового потока должен попадать отклик только от формирующих адрес частот МABBС во всем измерительном диапазоне [18]. Для многосенсорных систем добавляется требование уникальности комбинаций адресных частот МABBС.

Основа метода измерительного преобразования

Подход к определению смещения центральной частоты МABBС основан на преобразовании результирующего сигнала от МABBС в оптическом фильтре с наклонной линейной амплитудно-частотной характеристикой, и оптоэлектронном преобразовании оптического сигнала в радиочастотный диапазон на фотоприемнике с последующим решением системы нелинейных уравнений, полученных частотной фильтрацией результирующего сигнала после фотоприемника на адресных частотах.

Оптико-электронные схемы опроса одиночной МABBС, работающей на отражение или на пропускание, несколько отличаются друг от друга. Общими же принципами для них являются – прием и обработка светового отклика на фотоприемнике после его прохождения через фильтр с наклонной амплитудно-частотной характеристикой. Оптико-электронная схема опроса МABBС, работающая на прохождение лазерного излучения, представлена на рисунке 1, где использованы следующие обозначения: 1 – источник лазерного излучения с шириной спектра, соответствующего максимальному диапазону измерений; 2 – МABBС-датчик; 3 – фильтр с наклонной амплитудно-частотной характеристикой; 4 и 7 – измерительный и опорный фотоприемники; 5 и 8 – измерительный и опорный аналого-цифровые преобразователи; 6 – оптический делитель мощности. Двойной линией обозначены оптические соединительные линии, одинарной – электрический канал, буквами – диаграммы с соответствующими на указанных участках амплитудно-частотными схемами сигнала.

Лазерный источник 1 с шириной полосы излучения, соответствующей измерительному диапазону, генерирует непрерывное лазерное излучение a , которое, проходя через МABBС 2, формирует полигармоническое (в данном случае трехчастотное) непрерывное лазерное излучение c . Излучение проходит через фильтр с наклонной амплитудно-частотной характеристикой 3 и образует асимметричное трехчастотное лазерное излучение d , которое поступает на фотоприемник 4 и принимается на аналого-цифровом преобразователе 5.

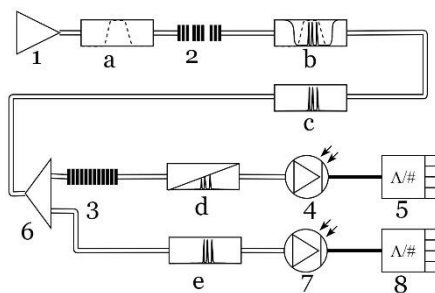


Рис. 1. Оптико-электронная схема опроса МАВБС

Fig. 1. MAFBS Interrogation Scheme

Микроконтроллер, производящий математическую обработку сигнала, на рисунке не приведен. В оптико-электронной схеме предусмотрен и опорный канал, в котором принимается фотоприемником 7 и оцифровывается на аналого-цифровом преобразователе 8 сигнал, не прошедший через фильтр с наклонной амплитудно-частотной характеристикой 3. Вся дальнейшая работа ведется с отношением сигналов в опорном и измерительном каналах, что позволяет исключить влияние флуктуаций интенсивности светового потока, не вызванных прямым воздействием на МАВБС.

Форма спектрального отклика МАВБС в амплитудно-частотной плоскости после прохождения излучения через фильтр с наклонной амплитудно-частотной характеристикой приведена на рисунке 2, где использованы обозначения: ω_1 , ω_2 и ω_3 – частоты оптических несущих; Ω_{21} и Ω_{32} – адресные частоты; k и b – известные параметры фильтра с наклонной амплитудно-частотной характеристикой.

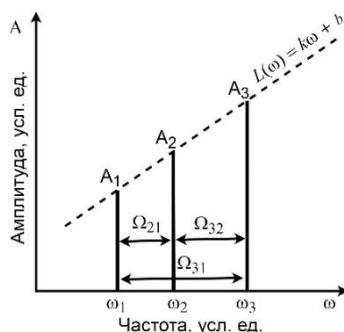


Рис. 2. Форма спектрального отклика МАВБС

Fig. 2. MAFBS Spectral Response Structure

Смещение центральной частоты МАВБС ведет к изменению взаимного отношения амплитуд отклика от частот МАВБС, что влечет за собой изменение параметров огибающей биений на адресных частотах Ω_{21} , Ω_{32} и их сумме $\Omega_{31} = \Omega_{21} + \Omega_{32}$.

Понятия центральной (брэгговской) частоты к МАВБС можно применять весьма условно, поскольку она имеет три (или более) выраженных брэгговских резонанса. Ввести понятие центральной частоты МАВБС можно любым способом, подразумевающим однозначность ее определения.

Используем определение центральной частоты МАВБС как взвешенное среднее:

$$\omega_{Br} = \frac{1}{4}(\omega_1 + 2\omega_2 + \omega_3). \quad (1)$$

Задача состоит в определении положения МАВБС (ω_1 , ω_2 , ω_3) в амплитудно-частотной плоскости по известным параметрам биений огибающей на адресных частотах.

Световой отклик от МАВБС, прошедший через фильтр с наклонной амплитудно-частотной характеристикой, записывается в виде:

$$S(t) = A_1 \sin(\omega_1 t + \varphi_1) + A_2 \sin(\omega_2 t + \varphi_2) + A_3 \sin(\omega_3 t + \varphi_3), \quad (2)$$

где A_1 , A_2 , A_3 – амплитуды светового отклика; φ_1 , φ_2 , φ_3 – начальные фазы сигнала на несущих частотах ω_1 , ω_2 и ω_3 . Выходной ток фотоприемника $F(t)$ пропорционален квадрату светового потока $S(t)$ с исключением из него колебаний на оптических (терагерцовых) частотах [17, 18]:

$$F(t) \sim A_1^2 + A_2^2 + A_3^2 + 2A_1A_2 \cos(\Omega_{21}t + \varphi_2 - \varphi_1) + 2A_2A_3 \cos(\Omega_{32}t + \varphi_3 - \varphi_2) + 2A_1A_3 \cos(\Omega_{31}t + \varphi_3 - \varphi_1). \quad (3)$$

Известными величинами в (3) являются адресные частоты Ω_{21} , Ω_{32} . Следовательно, постоянный уровень сигнала в (3) и частотная фильтрация на адресных частотах Ω_{21} , Ω_{32} , и их сумме Ω_{31} дает четыре независимых уравнения для определения трех неизвестных амплитуд A_1 , A_2 и A_3 :

$$\begin{cases} D_0 = A_1^2 + A_2^2 + A_3^2 \\ D_{21} = 2A_1A_2 \\ D_{32} = 2A_2A_3 \\ D_{31} = 2A_1A_3 \end{cases}, \quad (4)$$

где D_0 , D_{21} , D_{32} и D_{31} – измеренные величины постоянного уровня сигнала, амплитуды на адресных частотах Ω_{21} , Ω_{32} и суммы адресных частот Ω_{31} , соответственно.

Полученная система из четырех уравнений переопределена, поскольку количество уравнений превосходит количество неизвестных. Систему (4) необходимо дополнить требованием, что точки (ω_1, A_1) , (ω_2, A_2) , (ω_3, A_3) лежат на одной прямой:

$$L(\omega) = k\omega + b, \quad (5)$$

которая описывает параметры фильтра с линейной наклонной амплитудно-частотной характеристикой. Дополнительно, необходимо потребовать, чтобы разности $\omega_2 - \omega_1$, $\omega_3 - \omega_2$ равнялись адресным частотам Ω_{21} , Ω_{32} , соответственно, а так же автоматически выполнялось бы условие $\omega_3 - \omega_1 = \Omega_{32} + \Omega_{21}$. В силу этого, к системе уравнений (4) необходимо добавить соотношение:

$$\frac{A_2 - A_1}{\Omega_{21}} = \frac{A_3 - A_2}{\Omega_{32}}, \quad (6)$$

которое связывает параметры задачи, накладывая ограничения на нахождение амплитуд на одной прямой, одновременно задавая взаимные соотношения между частотами.

Определив из системы уравнений (4), дополненной соотношением (6), величины амплитуд A_1 , A_2 и A_3 и используя известные значения параметров k и b фильтра с наклонной линейной амплитудно-частотной характеристикой, вычислим положение характерных частот МАВБС – ω_1 , ω_2 и ω_3 .

Решение переопределенной системы уравнений (4) проведем методом наименьших квадратов путем поиска условного экстремума функции:

$$\Phi(A_i, \lambda) = (A_1^2 + A_2^2 + A_3^2 - D_0)^2 + (D_{12} - 2A_1A_2)^2 + (D_{23} - 2A_2A_3)^2 + (D_{13} + 2A_1A_3)^2, \quad (7)$$

относительно ограничения:

$$f(A_1, A_2, A_3) = (A_2 - A_1)\Omega_{32} - (A_3 - A_2)\Omega_{21} = 0, \quad (8)$$

потребовав минимум функции Лагранжа, составленной в виде:

$$\Psi(A_1, A_2, A_3, \lambda) = \Phi(A_1, A_2, A_3) + \lambda \cdot f(A_1, A_2, A_3) \rightarrow \min, \quad (9)$$

где параметр λ – множитель Лагранжа.

Требование (9) эквивалентно требованию равенства нулю всех частных производных от Ψ по искомым переменным A_1 , A_2 , A_3 и λ , что приводит к системе из четырех нелинейных уравнений:

$$\begin{cases} \partial\Phi/\partial A_1 - \lambda\Omega_{32} = 0 \\ \partial\Phi/\partial A_2 + \lambda(\Omega_{21} + \Omega_{32}) = 0 \\ \partial\Phi/\partial A_3 - \lambda\Omega_{21} = 0 \\ (A_2 - A_1)\Omega_{32} - (A_3 - A_2)\Omega_{21} = 0 \end{cases}, \quad (10)$$

где частные производные $\partial\Phi/\partial A_i$ не расписаны ввиду их очевидности.

Нелинейную, в силу нелинейности частных производных $\partial\Phi/\partial A_i$ ($i = 1, 2, 3$), систему уравнений (10) можно решить только численно. В качестве начальных условий можно взять значения A_1 , A_2 , A_3 , являющиеся решением системы уравнений (4) за исключением первого уравнения, а для λ можно взять начальное значение равным нулю:

$$A_{01} = \sqrt{\frac{D_{31}D_{21}}{2D_{32}}}, \quad A_{02} = \sqrt{\frac{D_{21}D_{32}}{2D_{31}}}, \quad A_{03} = \sqrt{\frac{D_{31}D_{32}}{2D_{21}}}, \quad \lambda_0 = 0. \quad (11)$$

После чего система уравнений (10), дополненная начальными значениями (11) решается любым хорошо сходящимся итерационным методом, например, методом Левенберга – Марквардта или Ньютона – Раффсона.

Решение системы уравнений (10) дает значения амплитуд A_1 , A_2 , A_3 , каждое из которых может быть использовано для определения положения МАВБС относительно фильтра с наклонной амплитудно-частотной характеристикой. Подставив найденные значения амплитуд A_1 , A_2 , A_3 в (5), и объединив их в (1), получим выражение для центральной частоты МАВБС:

$$\omega_{Br}(D_0, D_{12}, D_{13}, D_{32}) = \frac{1}{4k}(A_1 + A_2 + A_3 - 3b). \quad (12)$$

как функцию от измеренных значений D_0 , D_{21} , D_{32} и D_{31} – постоянного уровня сигнала, амплитуды на адресных частотах Ω_{21} , Ω_{32} и суммы адресных частот Ω_{31} , соответственно.

Альтернативным решением для определения центральной частоты одиночной МАВБС может служить введение обобщенного коэффициента модуляции выходного тока фотоприемника (3), который для трехадресной МАВБС может быть записан в виде:

$$M(\omega) = \frac{A_1A_2 + A_1A_3 + A_2A_3}{A_1^2 + A_2^2 + A_3^2}. \quad (13)$$

Заметим, что в частном случае, когда одна из амплитуд равна нулю, коэффициент модуляции совпадает с точностью до постоянного множителя с коэффициентом модуляции двухчастотных биений [18].

Зависимость (13) является монотонной функцией при смещении центральной частоты МАВБС относительно фильтра с наклонной амплитудно-частотной характеристикой. Монотонность обобщенного коэффициента модуляции (13) может служить единственным характерным параметром, по которому можно определять физическое воздействие на датчик.

Результаты численного моделирования

Используем классическую процедуру перевода параметров задачи в безразмерные величины, а в качестве характерных величин определим частоту – Ω^0 и амплитуду – A^0 . В качестве характерной частоты задачи Ω^0 выберем частоту, соответствующую 125 ГГц (что в терминах длин волн составляет 1 нм). Характерная амплитуда A^0 зависит от величины максимально выходного тока фотоприемника, который может быть независимо усилен или ослаблен до любого значения. Нормируем все переменные задачи так, чтобы максимальное смещение центральной частоты МАВБС не превышало 125 ГГц или Ω^0 , что в безразмерных величинах составляет одну единицу (1 нм). Максимальную амплитуду сигнала нормируем так, чтобы в безразмерных величинах максимальный уровень сигнала не превышал 1000 усл. ед. Исходя из этого, параметры фильтра с наклонной линейной амплитудно-частотной характеристикой составят: коэффициент наклона $k = 1000$ усл. ед., а $b = 100$

усл.ед. В качестве МАВБС выберем структуру с адресными частотами $\Omega_{21} = 0,01$ усл. ед. (1,25 ГГц) и $\Omega_{32} = 0,02$ усл. ед. (2,50 ГГц), при диапазоне изменения центральной частоты МАВБС в 1 усл. ед.

Относительную погрешность определения положения центральной частоты МАВБС, будем определять по формуле:

$$\varepsilon(D_0, D_{12}, D_{13}, D_{23}, E_F) = \frac{|\hat{\omega}_{Br} - \omega_{Br}|}{\omega_{Br}}, \quad (14)$$

где $\hat{\omega}_{Br} = \hat{\omega}_{Br}(D_0, D_{12}, D_{13}, D_{32})$ – положение центральной частоты МАВБС, вычисленной без погрешности, а $\omega_{Br} = \omega_{Br}(D_0, D_{12}, D_{13}, D_{32}, E_F)$ – положение, вычисленное при погрешности E_F определения амплитуд D_0, D_{21}, D_{32} и D_{31} .

Зададим погрешность определения амплитуд выходного сигнала с фотоприемника E_F от полной шкалы измерений и построим зависимость коэффициента модуляции (13) от смещения центральной частоты МАВБС (рисунок 3). Сплошными линиями показаны зависимости коэффициента модуляции, а пунктирной линией – спектральная характеристика фильтра с наклонной линейной амплитудно-частотной характеристикой. Графику для погрешности определения амплитуд в 0,01 % соответствует синяя линия, а для погрешности в 0,001 % измерения амплитуды выходного тока фотоприемника от полной шкалы измерений – красная.

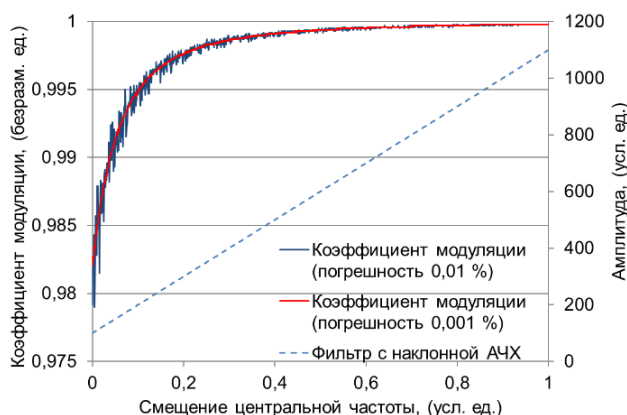


Рис. 3. Зависимость коэффициента модуляции от смещения центральной частоты МАВБС

Fig. 3. Modulation Factor as the Function of MAFBS Central Frequency

Относительная погрешность определения смещения центральной частоты МАВБС для погрешности определения амплитуд выходного тока фотоприемника в 0,01 % и 0,001 % от полного диапазона измерений не превышает 10^{-1} и 10^{-2} , соответственно, что не может считаться допустимыми значениями для высокоточных измерений. Сравнивая зависимости коэффициентов модуляции (см. рисунок 3), можно сделать вывод о том, что лишь высокоточное измерение амплитуд выходного тока фотоприемника приводит к приемлемой точности определения смещения центральной частоты МАВБС. Что делает техническую задачу

построения измерительных систем для определения сдвига центральной частоты МАВБС на основе измерения обобщенного коэффициента модуляции весьма затруднительной, поскольку требует высокой точности определения амплитуд выходного тока фотоприемника.

Кроме того, из анализа зависимости коэффициента модуляции от смещения центральной частоты МАВБС следует, что коэффициент модуляции не обеспечивает равномерности шкалы измерений на всем диапазоне изменения центральной частоты МАВБС. Задача регуляризации шкалы измерений может быть решена, например, методами, описанными в [17], однако это требует дополнительного усложнения измерительной схемы.

На рисунке 4 голубыми линиями показаны вычисленные значения амплитуд (A_1, A_2, A_3) частотных составляющих МАВБС, полученные путем численного решения системы уравнений (10) с начальными условиями (11). Толстыми (синей и красной) линиями показаны относительные погрешности определения смещения центральной частоты МАВБС от полного диапазона измерений.

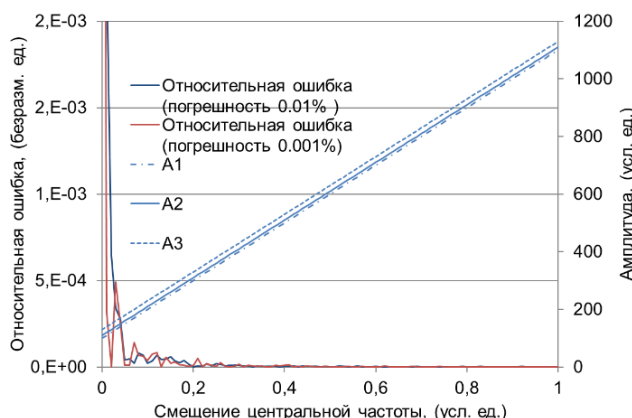


Рис. 4. Относительная ошибка определения смещения центральной частоты МАВБС

Fig. 4. Relative Error of the MAFBS Central Frequency Definition

Относительная погрешность определения смещения центральной частоты МАВБС (см. рисунок 4), выполненная для погрешности определения амплитуды в 0,01 % и 0,001 % от полного диапазона измерений, не превышает 10^{-4} почти во всем диапазоне измерений. Исключение составляет лишь небольшой участок расположения МАВБС относительно фильтра с наклонной линейной характеристикой там, где амплитуды близки к нулю. Сравнивая этот участок взаимного расположения МАВБС и фильтра с наклонной характеристикой методом определения смещения центральной частоты по величине обобщенного коэффициента модуляции, можно сделать наблюдение, что относительная погрешность в разы выше и для определения смещения центральной частоты по обобщенному коэффициенту модуляции.

Полученные результаты моделирования наглядно демонстрируют, что предложенный метод опре-

деления смещения центральной частоты МАВБС на два порядка лучше, чем определение смещения центральной частоты по обобщенному коэффициенту модуляции и является удовлетворительным показателем для высокоточных измерений.

Заключение

Результатом проведенных исследований является идея перехода от адресных волоконных брэгговских структур и радиофотонных сенсорных систем на их основе к многоадресным волоконным брэгговским структурам. Предложенная множественная адресация заключается в том, что в структуре ВБР формируется три (или более) сверхузкополосных частотных составляющих, разнесенных между собой на радиочастоту. Определение смещения центральных частот МАВБС аналогично адресным и осуществляется радиофотонными методами путем анализа результата биений оптических частот на фотоприемнике. По параметрам биений определяется смещение центральной частоты многоадресной структуры и в конечном итоге – величина приложенных физических полей.

В работе поставлена и решена задача однозначного определения сдвига центральной (брэгговской) частоты МАВБС с уникальным набором адресных частот.

Сделана попытка введения обобщенного коэффициента модуляции, который мог бы быть выбран единственным измеряемым параметром для определения смещения центральной частоты МАВБС. На примере математического моделирования показано, что его использование для высокоточных измерений влечет за собой высокие требования к точности измерений параметров выходного тока фотоприемника, что делает этот метод непривлекательным.

Приведена полная математическая модель, позволяющая с высокой точностью определять смещение центральной частоты многоадресной волоконной брэгговской структуры путем фильтрации выходного тока фотоприемника на адресных частотах и их комбинации.

На основе математической модели решена задача однозначного определения смещения центральной частоты МАВБС в условиях определения амплитуды колебаний выходного тока фотоприемника с погрешностью. Показано, что определение смещения центральной частоты МАВБС по параметрам адресной частотной фильтрации выходного тока фотоприемника позволяет переходить к построению измерительных систем.

Список используемых источников

1. Measures R.M., Melle S., Liu K. Wavelength demodulated Bragg grating fiber optic sensing systems for addressing smart structure critical issues // *Smart Materials and Structures*. 1992. Vol. 1. Iss. 1. PP. 36–44. DOI:10.1088/0964-1726/1/1/006
2. Davis M.A., Bellemore D.G., Kersey A.D. Structural strain mapping using a wavelength/time division addressed fiber Bragg grating array // *Proceedings of the II European Conference on Smart Structures and Materials* (Glasgow, United Kingdom, 12–14 October 1994). 1994. Vol. 2361. PP. 342–345. DOI:10.1117/12.184861
3. Matveenko V.P., Shardakov I.N., Voronkov A.A., Kosheleva N.A., Lobanov, D.S., Serovaev G.S., et al. Measurement of strains by optical fiber Bragg grating sensors embedded into polymer composite material // *Structural Control Health Monitoring*. 2017. Vol. 25. Iss. 3. PP. 1–11. DOI:10.1002/stc.2118
4. Qiao X., Shao Z., Bao W., Rong Q. Fiber Bragg Grating Sensors for the Oil Industry // *Sensors*. 2017. Vol. 17, Iss. 3. DOI:10.3390/s17030429
5. Ma Z., Chen X. Fiber Bragg Gratings Sensors for Aircraft Wing Shape Measurement: Recent Applications and Technical Analysis // *Sensors*. 2019. Vol. 19. Iss. 1. DOI:10.3390/s19010055
6. Karim F. Full Matlab Code for Synthesis and Optimization of Bragg Gratings. Newcastle upon Tyne: Cambridge Scholars Publishing, 2019. 24 p.
7. Cormier G., Boudreau R., Thériault S. Real-coded genetic algorithm for Bragg grating parameter synthesis // *JOSA B*. 2001. Vol. 18. Iss. 12. PP. 1771–1776. DOI:10.1364/JOSAB.18.001771
8. Li K. Review of the Strain Modulation Methods Used in Fiber Bragg Grating Sensors // *Journal of Sensors*. 2016. Vol. 9. Iss. 4. DOI:10.1155/2016/1284520
9. Koo K.P., LeBlanc M., Tsai T.E., Vohra S.T. Fiber-chirped grating Fabry–Perot sensor with multiple-wavelength-addressable free-spectral ranges // *IEEE Photonics Technology Letters*. 1998. Vol. 10. Iss. 7. PP. 1006–1008. DOI:10.1109/68.681299
10. Wei Z., Ghafouri-Shiraz H., Shalaby H.M.H. New code families for fiber-Bragg-grating-based spectral-amplitude-coding optical CDMA systems // *IEEE Photonics Technology Letters*. 2001. Vol. 13. Iss. 8. PP. 890–892. DOI: 10.1109/68.935838
11. Kataoka N. Phase-shifted superstructured fiber Bragg grating // *Fujikura Technical Review*. 2011. No. 40. PP. 6–11.
12. Triana C.A., Pastor D., Varón M. Optical code division multiplexing in the design of encoded fiber Bragg grating sensors // *Óptica Pura y Aplicada*. 2016. Vol. 49. No. 1. PP. 17–28. DOI:10.7149/OPA.49.1.17
13. Triana A., Pastor D. Interrogation of super-structured FBG sensors based on discrete prolate spheroidal sequences // *Proceedings of SPIE* (Prague, Czech Republic, 24–27 April 2017). 2017. Vol. 10231. DOI:10.1117/12.2267238
14. Djordjevic I.B., Saleh A.H., Küppers F. Design of DPSS based fiber bragg gratings and their application in all-optical encryption, OCDMA, optical steganography, and orthogonal-division multiplexing // *Optics Express*. 2014. Vol. 22. Iss. 9. PP. 10882–10897. DOI:10.1364/OE.22.010882
15. Kim Y., Jeon S.-W., Kwon W.-B., Park C.-S. A Wide Dynamics and Fast Scan Interrogating Method for a Fiber Bragg Grating Sensor Network Implemented Using Code Division Multiple Access // *Sensors*. 2012. Vol. 12. Iss. 5. PP. 5888–5895. DOI:10.3390/s120505888

16. Triana A., Pastor D., Varón M. A Code Division Design Strategy for Multiplexing Fiber Bragg Grating Sensing Networks // *Sensors*. 2017. Vol. 17. Iss. 11. DOI:10.3390/s17112508

17. Сахабутдинов А.Ж. Радиопотонные сенсорные системы на адресных волоконных брэгговских структурах и их применение для решения практических задач. Дис. ... докт. техн. наук. Казань: Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ, 2018.

18. Морозов О.Г., Сахабутдинов А.Ж. Адресные волоконные брэгговские структуры в квазираспределённых радиопотонных сенсорных системах // *Компьютерная оптика*. 2019. Т. 43. № 4. С. 535–543. DOI:10.18287/2412-6179-2019-43-4-535-543

19. Новикова В.А., Коннов К.А., Грибаев А.И., Варжель С.В. Способ формирования волоконной брэгговской решётки с фазовым сдвигом. Патент на изобретение RU 2676191 от 24.01.2018. Опубл. 26.12.2018. Бюл. № 36. 12 с.

* * *

Multicast Fiber Bragg Structures in Microwave Photonics Sensor Systems

T. Agliullin¹, V. Anfinogentov¹, R. Misbahov², O. Morozov¹, A. Sakhabutdinov¹

¹Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev,
Kazan, 4200111, Russian Federation

²Kazan State Power Engineering University,
Kazan, 420066, Russian Federation

Article info

DOI:10.31854/1813-324X-2020-6-1-6-13

Received 28 th February 2020

Accepted 11th March 2020

For citation: Agliullin T., Anfinogentov V., Misbahov R., Morozov O., Sakhabutdinov A. Multicast Fiber Bragg Structures in Microwave Photonics Sensor Systems. *Proc. of Telecom. Universities*. 2020;6(1):6–13. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2020-6-1-6-13

Abstract: The article describes the transition concept from addressable fiber Bragg structures and microwave-photonics sensor systems based on them to multicast fiber Bragg structures. The difference between multicast structures and address structures is that in the fiber Bragg structure forms three or more super narrow-band frequency components, spaced from each other by the microwave frequency. The central frequencies shift of multicast Bragg structures is determined by the result of processing the signal of optical frequencies beats at the photodetector, which parameters judge the applied physical fields. We see the solved problem of uniquely determining the central (Bragg) frequency shift of the multicast fiber Bragg structure, with a unique set of address frequencies.

Keywords: microwave-photonics sensor systems, fiber Bragg gratings, address and multicast fiber Bragg structures.

References

1. Measures R.M., Melle S., Liu K. Wavelength demodulated Bragg grating fiber optic sensing systems for addressing smart structure critical issues. *Smart Materials and Structures*. 1992;1(1):36–44. DOI:10.1088/0964-1726/1/1/006
2. Davis M.A., Bellemore D.G., Kersey A.D. Structural strain mapping using a wavelength/time division addressed fiber Bragg grating array. *Proceedings of the II European Conference on Smart Structures and Materials, 12–14 October 1994, Glasgow, United Kingdom*. 1994. vol.2361. p.342–345. DOI:10.1117/12.184861
3. Matveenkov V.P., Shardaikov I.N., Voronkov A.A., Kosheleva N.A., Lobanov, D.S., Serovaev G.S., et al. Measurement of strains by optical fiber Bragg grating sensors embedded into polymer composite material. *Structural Control Health Monitoring*. 2017;25(3):1–11. DOI:10.1002/stc.2118
4. Qiao X., Shao Z., Bao W., Rong Q. Fiber Bragg Grating Sensors for the Oil Industry. *Sensors*. 2017;17(3). DOI:10.3390/s17030429
5. Ma Z., Chen X. Fiber Bragg Gratings Sensors for Aircraft Wing Shape Measurement: Recent Applications and Technical Analysis. *Sensors*. 2019;19(1). DOI:10.3390/s19010055
6. Karim F. *Full Matlab Code for Synthesis and Optimization of Bragg Gratings*. Newcastle upon Tyne: Cambridge Scholars Publishing; 2019. 24 p.

7. Cormier G., Boudreau R., Thériault S. Real-coded genetic algorithm for Bragg grating parameter synthesis. *JOSA B*. 2001; 18(12):1771–1776. DOI:10.1364/JOSAB.18.001771
8. Li K. Review of the Strain Modulation Methods Used in Fiber Bragg Grating Sensors. *Journal of Sensors*. 2016;9(4). DOI:10.1155/2016/1284520
9. Koo K.P., LeBlanc M., Tsai T.E., Vohra S.T. Fiber-chirped grating Fabry–Perot sensor with multiple-wavelength-addressable free-spectral ranges. *IEEE Photonics Technology Letters*. 1998;10(7):1006–1008. DOI:10.1109/68.681299
10. Wei Z., Ghafouri-Shiraz H., Shalaby H.M.H. New code families for fiber-Bragg-grating-based spectral-amplitude-coding optical CDMA systems. *IEEE Photonics Technology Letters*. 2001;13(8):890–892. DOI:10.1109/68.935838
11. Kataoka N. Phase-shifted superstructured fiber Bragg grating. *Fujikura Technical Review*. 2011;40:6–11.
12. Triana C.A., Pastor D., Varón M. Optical code division multiplexing in the design of encoded fiber Bragg grating sensors. *Óptica Pura y Aplicada*. 2016;49(1):17–28. DOI:10.7149/OPA.49.1.17
13. Triana A., Pastor D. Interrogation of super-structured FBG sensors based on discrete prolate spheroidal sequences. *Proceedings of SPIE, 24–27 April 2017, Prague, Czech Republic*. 2017. vol.10231. DOI:10.1117/12.2267238
14. Djordjevic I.B., Saleh A.H., Küppers F. Design of DPSS based fiber bragg gratings and their application in all-optical encryption, OCDMA, optical steganography, and orthogonal-division multiplexing. *Optics Express*. 2014;22(9):10882–10897. DOI:10.1364/OE.22.010882
15. Kim Y., Jeon S.-W., Kwon W.-B., Park C.-S. A Wide Dynamics and Fast Scan Interrogating Method for a Fiber Bragg Grating Sensor Network Implemented Using Code Division Multiple Access. *Sensors*. 2012;12(5):5888–5895. DOI:10.3390/s120505888
16. Triana A., Pastor D., Varón M. A Code Division Design Strategy for Multiplexing Fiber Bragg Grating Sensing Networks. *Sensors*. 2017;17(11). DOI:10.3390/s17112508
17. Sakhabutdinov A.J. Radio-Photon Sensor Systems Based on Address Fiber Bragg Structures and their Application for Solving Practical Problems. D.Sc. Thesis. Kazan: Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI Publ., 2018. (in Russ.)
18. Morozov O.G., Sakhabutdinov A.J. Addressed fiber Bragg structures in quasi-distributed microwave-photonic sensor systems. *Computer Optics*. 2019;43(4):535–543. (in Russ.) DOI:10.18287/2412-6179-2019-43-4-535-543
19. Novikova V.A., Konnov K.A., Gribov A.I., Vargel S.V. The Method of Forming a Fiber Bragg Grating with a Phase Shift. Patent RF, no. 2676191, 24.01.2018 (in Russ.)

Сведения об авторах:

АГЛИУЛЛИН
Тимур Артурович

аспирант кафедры радиотоники и микроволновых технологий Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева-КАИ, taagliullin@mail.ru
 <https://orcid.org/0000-0003-1043-7487>

АНФИНОГЕНТОВ
Владимир Иванович

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры специальной математики Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева-КАИ, v.anfinogentov@yandex.ru
 <https://orcid.org/0000-0003-0015-2429>

МИСБАХОВ
Ринат Шаукатович

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры теоретических основ электротехники, старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Физико-химические процессы в энергоустановках» Казанского государственного энергетического университета, energy@zerdex.pro,
 <https://orcid.org/0000-0002-7613-8810>

МОРОЗОВ
Олег Геннадьевич

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой радиотоники и микроволновых технологий Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева-КАИ, microoil@mail.ru
 <https://orcid.org/0000-0003-4779-4656>

САХАБУТДИНОВ
Айрат Жавдатович

доктор технических наук, профессор кафедры радиотоники и микроволновых технологий Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева-КАИ, azhsakhabutdinov@kai.ru
 <https://orcid.org/0000-0002-0713-7806>