

Адресные волоконные брэгговские структуры в квазираспределённых радиопотонных сенсорных системах

О.Г. Морозов¹, А.Ж. Сахабутдинов¹

¹Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ,
420111, ул. К. Маркса, 10, Россия, Казань,

Аннотация

В статье предложена теория и техника адресных волоконных брэгговских структур и нового класса радиопотонных сенсорных систем на их основе, отличающаяся от существующих тем, что в волоконной брэгговской структуре формируется две сверхузкополосные частотные составляющие, разнесённые на уникальную разностную адресную частоту. Определение смещения центральных частот брэгговских структур осуществляется по результатам обработки сигнала биений адресных частот на фотоприёмнике, по параметрам которого судят о приложенных физических полях. Поставлена и решена задача однозначного определения сдвига центральных (брэгговских) частот адресных волоконных брэгговских структур с уникальными адресными частотами и одинаковой брэгговской частотой, объединённых в единую многосенсорную систему с приёмом мультиплексированного отклика на одном фотодетекторе.

Ключевые слова: радиопотонные сенсорные системы, волоконные решётки Брэгга, адресные волоконные брэгговские структуры.

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

Введение

Радиопотоника – современное направление научных исследований, изучающее взаимодействие оптического излучения и радиочастотного сигнала в задачах приёма, передачи и обработки информации.

Общей проблемой опроса множества волоконных брэгговских структур (ВБС) в волоконно-оптических и радиопотонных сенсорных сетях (РФСС) является сложность и дороговизна приборов их опроса, обусловленная применяемыми технологиями мультиплексирования датчиков [1–5]. Волновое [1], временное [2], частотное [3], поляризационное [4] и пространственное [5] мультиплексирование требуют применения таких сложных устройств, как оптические анализаторы спектра, спектрометры с перестраиваемыми интерферометрами Фабри–Перо, с дифракционными решётками, излучение которых принимается и анализируется на ПЗС-матрицах и т.д.

Сложность применяемых технологий мультиплексирования и опроса объясняется и ещё одним важным фактором – опрашиваемые датчики не являются адресными, поэтому любое перекрытие спектров ВБС приводит к существенным ошибкам измерений [6–8]. Несомненно, условная адресация у датчиков есть. Они, как указывалось выше, имеют различные центральные длины волн, объединены пространственно в различные группы, расположены на различных расстояниях от источника зондирования и т.д. Последний фактор широко используется в импульсных системах адресного кодированного опроса, комбинированных с другими видами мультиплексирования [9–11]. Преимущество использования условной адресации нашло применение при построении сенсорных сетей на основе интерфе-

рометрических измерений различных типов [12, 13], например, интерферометрии со сдвигом частоты [13], в которых возможно разделение откликов от ВБС с одинаковой центральной длиной волны и которые максимально эффективны по используемому диапазону зондирующих длин волн.

Параллельно с разработкой технологий мультиплексирования и опроса развивались методы создания спектрально-кодированных ВБС, информация о структуре которых позволила бы обеспечить полное разделение откликов от датчиков, работающих в одном и том же диапазоне частот [14–17]. Спектрально-кодированные датчики основаны на технологии кодового мультиплексирования [16–17]. В частности, используются оптические ортогональные коды для формирования спектральной структуры ВБС, уникальной для каждого датчика. Опрос спектрально-кодированных ВБС производится в режиме реального времени с помощью определения функции автокорреляции между отражённым 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 при использовании кодов Слепяна на основе ортогональных дискретных протяжённых сфероидальных последовательностей [18–21]. Однако и для их опроса требуется источник двухчастотного сканирующего излучения и электронный векторный анализатор для проведения дополнительных вычислений.

В последнее время в практику радиопотонных сенсорных сетей вошли ВБС со случайной спектральной структурой [22–25]. Когда параметры окружающей среды изменяются, спектральные ком-

поненты ВБС со случайной спектральной структурой сдвигаются аналогично сдвигу центральной длины волны обычной ВБС. После корреляции с эталонным спектром отражённый случайный спектр, уникальный для каждой ВБС, может быть значительно сжат, что определяет возможность измерений с высоким разрешением [22]. Однако и для таких измерений необходим оптический спектральный анализатор, что уменьшает скорость опроса в сенсорной системе. Упрощение системы опроса было достигнуто при использовании импульсного зондирования и проекции отражённых случайных спектров на линейно chirпированную ВБС, что позволяет перенести спектральную информацию о сдвиге на шкалу времени и получить дополнительный выигрыш в разрешающей способности измерений [23–25]. При этом для регистрации требуется цифровой процессор определения сверхмалых временных интервалов, определяемых временем прихода импульсных откликов от пространственно разнесённых датчиков.

Более простое решение может быть найдено при использовании адресных волоконных брэгговских структур (АВБС), которые бы могли одновременно и выполнять функции формирователя двух- или полигармонических излучений, и продолжать оставаться чувствительным элементом РФСС, если значение разностной частоты будет инвариантно к контролируемым физическим полям, а набор разностных частот будет ортогонален в массиве таких датчиков.

АВБС не отличаются по своей природе и принципами реакции на воздействие физических полей от классических ВБР. Отличие подхода состоит в методике определения их центральных частот. Все остальные задачи построения решаются на основе известных и ранее разработанных принципов, что делает перспективным применение РФСС на АВБС для задач одно-, мало- и многосенсорных приложений.

Адресная волоконная брэгговская структура

Адресной волоконной брэгговской структурой назовём такую структуру в оптическом волокне, которая удовлетворяет следующему набору требований. При направлении на неё широкополосного лазерного излучения с равномерной амплитудно-частотной характеристикой она в оптическом диапазоне формирует двухчастотный сигнал, разность между частотами которого много меньше несущих оптических частот и находится в радиочастотной области спектра. Разностная частота между двумя частотными составляющими инвариантна к воздействию физических полей и не меняется при смещении центральной частоты АВБС. Полная ширина на половине высоты спектральных составляющих, образующих двухчастотный отклик, одинакова и много меньше разностной частоты.

Существует как минимум два теоретических подхода к формированию АВБС с инвариантным расстоянием между её адресными частотами при воздействии на неё измеряемых полей. Первым подходом

является использование волоконных брэгговских решёток (ВБР) с двумя симметричными фазовыми π -сдвигами (2π -ВБР), а вторым – использование двух идентичных разнесённых по длине волны сверхузкополосных ВБР (2λ -ВБР).

Волоконные брэгговские решётки с двумя симметричными фазовыми π -сдвигами привлекают внимание разработчиков волоконно-оптических датчиков [26–28], поскольку они достаточно легки в производстве и могут быть изготовлены при помощи фазовой маски с минимально предъявляемыми требованиями к параметрам модуляции коэффициента преломления и равномерности характеристик его профиля [29, 30]. АВБС 2π -ВБР представляет собой три последовательно расположенные ВБР с фазовыми π -сдвигами между ними. Широкополосное лазерное излучение, прошедшее через 2π -ВБР, формирует двухчастотное излучение в области окон прозрачности, соответствующих спектральному расположению двух симметричных фазовых π -сдвигов вблизи центральной частоты средней решётки. АВБС в виде 2λ -ВБР структуры также просты в производстве и могут быть получены с использованием стандартного ультрафиолетового лазера и применения нанометровых подвижек, как показано в [31]. При записи может быть использована как фазовая маска, так и другие интерферометрические схемы. В работах [32, 33] предложен метод записи АВБС с помощью механического натяжения оптического волокна.

Характерной особенностью АВБС как 2λ -ВБР, так и 2π -ВБР является инвариантность расстояния между адресными частотами в амплитудно-частотной плоскости при наложении на них деформационных или температурных полей, что позволяет использовать эту характерную особенность АВБС для формирования адреса при мультиплексировании их в массив датчиков.

Основа метода измерительного преобразования

Чтобы АВБС можно было использовать в качестве чувствительных элементов РФСС, необходимо потребовать выполнения двух дополнительных условий. Первое условие – в область анализа светового потока попадает отклик только от двух формирующих адрес частот каждой АВБС на всем измерительном диапазоне. Второе условие – АВБС, имеющие одинаковую центральную (брэгговскую) частоту, должны иметь различные адресные частоты.

Подход к определению смещения центральной (брэгговской) частоты основан на оптическом преобразовании результирующего сигнала от АВБС в линейном наклонном фильтре с наклонной амплитудно-частотной характеристикой и оптоэлектронном преобразовании оптического сигнала в радиочастотный диапазон на фотоприёмнике с последующим решением системы нелинейных уравнений, полученных адресной частотной фильтрацией результирующего сигнала после фотоприёмника.

Форма спектрального отклика АВБС в амплитудно-частотной плоскости после прохождения излучения через фильтр с наклонной амплитудно-частотной характеристикой приведена на рис. 1, где использованы обозначения: ω_C – центральная (брэгговская) частота АВБС; ω – частота левой частотной составляющей; δ – полная ширина на половине высоты частотных компонент, формирующих адрес; Ω – адресная частота; u и v – параметры линейного наклонного фильтра.

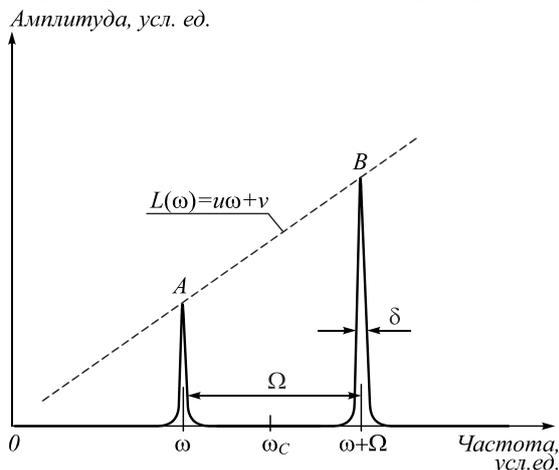


Рис. 1. Форма спектрального отклика АВБС

Оптико-электронная схема опроса одиночной АВБС представлена на рис. 2.

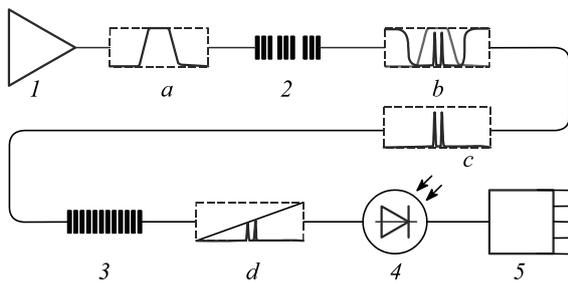


Рис. 2. Оптико-электронная схема опроса АВБС

Лазерный источник 1 с шириной полосы излучения, соответствующей измерительному диапазону, формирует непрерывное лазерное излучение, которое, проходя через АВБС 2, формирует двухчастотное непрерывное лазерное излучение (диаграмма *c* на рис. 2). Излучение проходит через фильтр 3 с наклонной амплитудно-частотной характеристикой и образует асимметричное двухчастотное лазерное излучение (диаграмма *d*), которое поступает на фотоприёмник 4 и принимается на аналого-цифровом преобразователе 5. Микроконтроллер, производящий математическую обработку сигнала, на рисунке не приведён.

Смещение центральной (брэгговской) частоты АВБС ведёт к изменению взаимного отношения амплитуд двухчастотного отклика от АВБС, что влечёт за собой изменение глубины модуляции и амплитуды колебаний двухчастотного биения результирующего отклика от АВБС на фотоприёмнике.

Уравнение огибающей кривой двухчастотного биения результирующего отклика от АВБС на фотопри-

ёмнике зависит от амплитуд левой и правой частотных составляющих и имеет вид:

$$S(t, \omega_C) = A^2 + B^2 + 2AB \cos(\Omega t + \varphi), \quad (1)$$

где A – амплитуда левой и B – правой частотных составляющих, формирующих адрес, которые зависят от положения центральной (брэгговской) частоты АВБС: $A = A(\omega_C)$ и $B = B(\omega_C)$, φ – разность фаз оптических несущих. Коэффициент модуляции (2) огибающей биений (1) можно использовать как единственный измеряемый параметр для определения центральной (брэгговской) частоты АВБС:

$$M(\omega_C) = \frac{2 \cdot A(\omega_C) \cdot B(\omega_C)}{A^2(\omega_C) + B^2(\omega_C)}. \quad (2)$$

Зависимость коэффициента модуляции огибающей (2) – монотонная функция, зависящая от смещения центральной (брэгговской) частоты АВБС (рис. 3). Следовательно, существует обратная функция $\omega_C(M)$, позволяющая определить смещение брэгговской частоты АВБС по известному значению коэффициента модуляции.

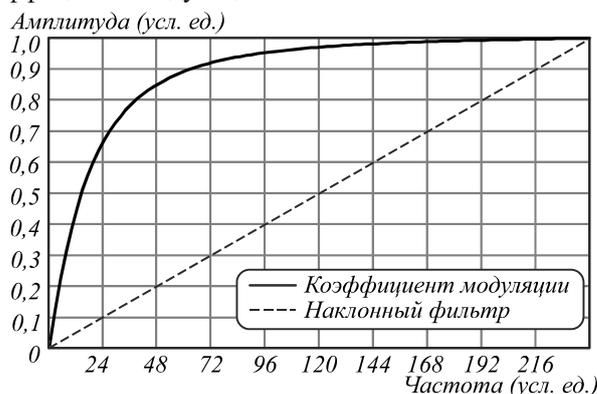


Рис. 3. Зависимость коэффициента модуляции от смещения центральной частоты АВБС: сплошная линия – коэффициент модуляции; пунктирная – параметры наклонного фильтра

Главным требованием является то, что зависимость коэффициента модуляции от смещения центральной (брэгговской) частоты АВБС должна быть заранее детерминирована при известных параметрах наклонного фильтра для каждой АВБС.

Несмотря на то, что зависимость коэффициента модуляции от смещения центральной частоты АВБС – монотонная и позволяет решать задачу определения смещения центральной частоты АВБС под воздействием физических полей, и, как следствие, определения величины этого воздействия, она не обеспечивает равномерности шкалы измерений. Кроме того, необходимо обеспечить и независимость измерительной информации от флуктуаций мощности светового потока на фотоприёмнике, не связанных с воздействием измеряемых физических полей.

Для линеаризации шкалы измерений можно использовать фильтры с нелинейной амплитудно-частотной характеристикой. Например, фильтры с амплитудно-частотной характеристикой, подчиняющей-

ся степенному закону, или, например, фильтры с экспоненциальной формой профиля (3):

$$L(\omega) = e^{C(\omega/\omega_{\max})^n} - 1. \quad (3)$$

где ω_{\max} – максимальное значение диапазона измерений, а n и C – параметры фильтра.

При применении нелинейных фильтров недостаток неравномерности шкалы измерений нивелируется. Другим вариантом улучшения разрешающей способности шкалы измерений является возможность наложения двух встречных наклонных фильтров в разных плечах отражённого сигнала и проведения измерения в том плече, в котором бóльший уровень сигнала.

Избежать флуктуаций мощности светового потока на фотоприёмнике, не связанных с воздействием физических полей на АВБС-сенсор, предлагается при помощи нормировки мощности светового потока за счёт создания двух каналов – опорного без наклонного фильтра и измерительного с наклонным фильтром, и нормировки величины коэффициента модуляции (2) на полную мощность в опорном канале.

В рамках предложенной оптико-электронной схемы дополнительно необходимо решить задачу температурной стабилизации фильтра с наклонной частотной характеристикой, чтобы избежать искажений сигнала, связанных с его температурным дрейфом. Задача температурной стабилизации фильтра решается стандартным для этого методом и не рассматривается в рамках этой работы.

Математическая модель

Применение двух (и более) АВБС с одинаковой центральной (брэгговской) частотой в измерительной системе обладает рядом преимуществ. Во-первых, это значительно снижает требования к диапазону рабочих частот всех оптических компонент системы. Во-вторых, как следствие, ведет к значительному удешевлению стоимости применяемых компонент. В-третьих, является путем к унификации компонент сенсорной системы. Вместе с этим возникают и дополнительные сложности в определении центральных (брэгговских) частот АВБС в массиве сенсоров, поскольку в системе возникают множественные перекрестные биения всех частотных компонент, формирующих адресные частоты АВБС.

В измерительной системе не накладывается никаких дополнительных ограничений на взаимное расположение массива АВБС во всем диапазоне измерений, следовательно, на фотоприемнике будут происходить все возможные комбинации перекрестных биений всех частотных компонент, формирующих адреса АВБС. Кроме того, в системе могут возникать частоты биений как повторяющиеся, так и кратные адресным частотам АВБС, что существенно усложняет поиск и идентификацию их центральных частот.

Несмотря на это, был найден метод обработки комплексированного сигнала, принятого от массива АВБС с одинаковой центральной частотой и разными разностными частотами, который позволяет решить

задачу однозначного определения положений центральных частот всех АВБС в массиве сенсоров.

Функциональная оптико-электронная схема опроса массива АВБС сенсоров приведена на рис. 4, на котором использованы обозначения: 1 – источник лазерного излучения с шириной спектра, соответствующий максимальному диапазону измерений; 2.1–2.N – массив АВБС-сенсоров; 3 – фильтр с наклонной амплитудно-частотной характеристикой; 4 и 7 – измерительный и опорный фотоприемники; 5, 8 – измерительный и опорный АЦП; 6, 9 – делители, 10 – сумматор мощности светового потока.

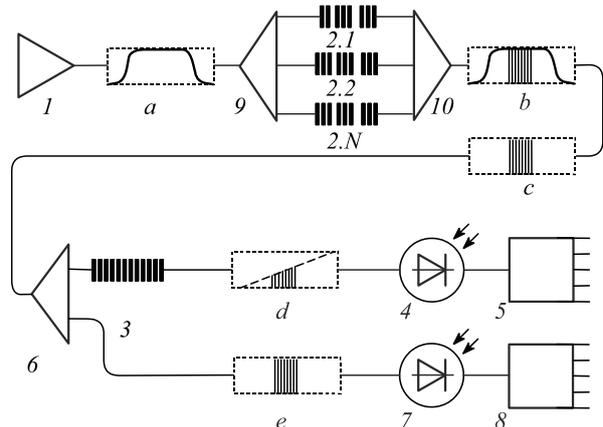


Рис. 4. Функциональная оптико-электронная схема опроса массива АВБС

Буквами *a–e* на рис. 4 обозначены схемы спектральных характеристик оптического излучения на соответствующем участке оптико-электронной схемы. Форма спектрального отклика сигнала, поступающего на измерительный фотоприемник, приведена на рис. 5, на котором использованы обозначения: ω_i – положение левых, $\omega_i + \Omega_i$ – положение правых составляющих; ω_{Br} – центральная (брэгговская) частота; Ω_i – адресные частоты АВБС; амплитуды левой и правой гармоник, образующих адресную частоту, обозначены A_i и B_i . Разностные частоты Ω_i сенсоров, объединенных в массив, не совпадают.

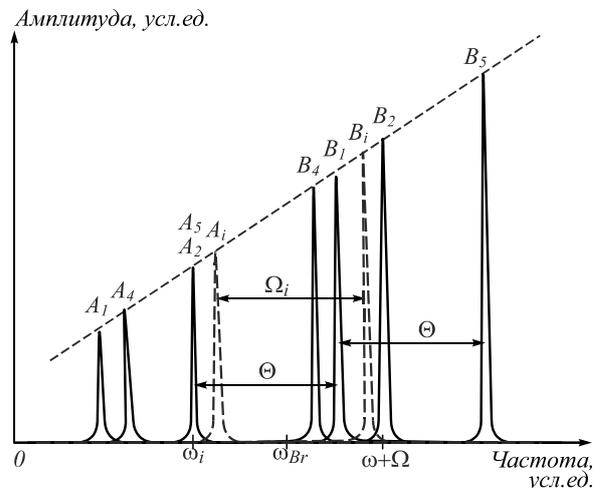


Рис. 5. Форма спектрального отклика сигнала, поступающего на измерительный фотоприемник

На фотоприемнике, как на нелинейном квадратичном элементе, возникают парные биения всех частотных составляющих – A_i и B_i . Полученный сложный сигнал принимается на аналого-цифровой преобразователь и служит источником информации для определения центральных длин волн всех входящих в измерительную систему сенсоров.

Суммарный отклик массива АВБС_i на фотоприемнике равен квадрату суммы откликов всех частотных компонент, входящих в сигнал (4):

$$F(t) = \left[\sum_{i=1}^N A_i \sin(\omega_i t) + B_i \sin((\omega_i + \Omega_i)t) \right]^2. \quad (4)$$

Запись выходного сигнала в виде (4) позволяет выполнить преобразования, исключаяющие из записи (4) все оптические высокочастотные слагаемые и перевести анализ сигнала в радиочастотный диапазон. Для чего разобьем выражение (4) на две отдельные суммы, вынесем постоянный множитель за скобки суммирования, возведем выражение в квадрат, избавимся от степени в множителе, выполнив процедуру понижения степени, получим промежуточное выражение для полной формы сигнала. Поскольку фотоприемник не чувствителен к колебаниям мощности на оптических частотах, то из промежуточного выражения для полной формы сигнала можно без потери физического смысла исключить все слагаемые с колебаниями на частотах выше, чем максимальная адресная частота АВБС. Результирующий сигнал после фотоприемника на АЦП имеет вид (5):

$$P(t) = \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^N \begin{pmatrix} A_i A_k \cos((\omega_i - \omega_k)t) + \\ A_i B_k \cos((\omega_i - \omega_k - \Omega_k)t) + \\ B_i A_k \cos((\omega_i - \omega_k + \Omega_i)t) + \\ B_i B_k \cos((\omega_i - \omega_k + \Omega_i - \Omega_k)t) \end{pmatrix}. \quad (5)$$

Узкополосная фильтрация сигнала (5) на адресных частотах АВБС-сенсоров позволяет получить систему уравнений (6), которая дает возможность определить положение центральных (брэгговских) частот всех АВБС в массиве:

$$\sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^N \begin{pmatrix} A_i A_k e^{-\frac{(\Omega_j - |\omega_i - \omega_k|)^2}{2\sigma^2}} + \\ A_i B_k e^{-\frac{(\Omega_j - |\omega_i - \omega_k - \Omega_k|)^2}{2\sigma^2}} + \\ B_i A_k e^{-\frac{(\Omega_j - |\omega_i - \omega_k + \Omega_i|)^2}{2\sigma^2}} + \\ B_i B_k e^{-\frac{(\Omega_j - |\omega_i - \omega_k + \Omega_i - \Omega_k|)^2}{2\sigma^2}} \end{pmatrix} = D_j, \quad j = \overline{1, N}, \quad (6)$$

где D_j – амплитуда сигнала на частоте Ω_j , множитель с экспонентой при каждом слагаемом описывает частотный фильтр на адресной частоте на частоте Ω_j .

Система уравнений (6) может быть решена только численно. Наиболее подходящим методом для решения систем уравнений такого класса являются итерационные методы – модифицированный метод Ньютона–Рафсона или метод Левенберга–Марквардта, которые обладают квадратичной сходимостью.

Неизвестными величинами в системе уравнений (6) являются ω_j . Амплитуды A_j и B_j связаны с ω_j через известные параметры наклонного фильтра (7):

$$\begin{aligned} A_j &= L(\omega_j) = u\omega_j + v, \\ B_j &= L(\omega_j + \Omega_j) = u(\omega_j + \Omega_j) + v. \end{aligned} \quad (7)$$

Все итерационные методы предполагают задание начальных условий для старта и обеспечения сходимости итерационного процесса. Чтобы обеспечить сходимость метода, в качестве начальных условий можно принять данные, полученные в качестве решения системы уравнений (6) в условиях отсутствия вклада перекрестных биений. В этом случае система уравнений (6) становится совокупностью независимых друг от друга уравнений, каждое из которых может быть решено как квадратное уравнение:

$$\omega_j^{(0)} = \frac{1}{2u} \left[\sqrt{u^2 \Omega_j^2 + 4D_j^H} - (u\Omega_j + 2v) \right]. \quad (8)$$

Можно показать [34], что (8) в качестве начальных условий является необходимым и достаточным для сходимости итерационного метода решения системы уравнений (6).

Некоторые результаты численного моделирования

Рассмотрим наиболее часто встречающийся случай произвольного взаимного расположения массива АВБС, когда их взаимное расположение не предполагает неоднозначности в определении их положений. То есть для каждой адресной частоты АВБС получаем отклик только от той АВБС на адресной частоте, на которой происходит опрос. На рис. 6а показано ситуационное взаимное расположение массива из четырех АВБС, при котором правые и левые частотные составляющие не совпадают, а их взаимное расположение не образует разностных частот, совпадающих с адресными; на рис. 6б приведена низкочастотная часть спектра результирующего оптического сигнала.

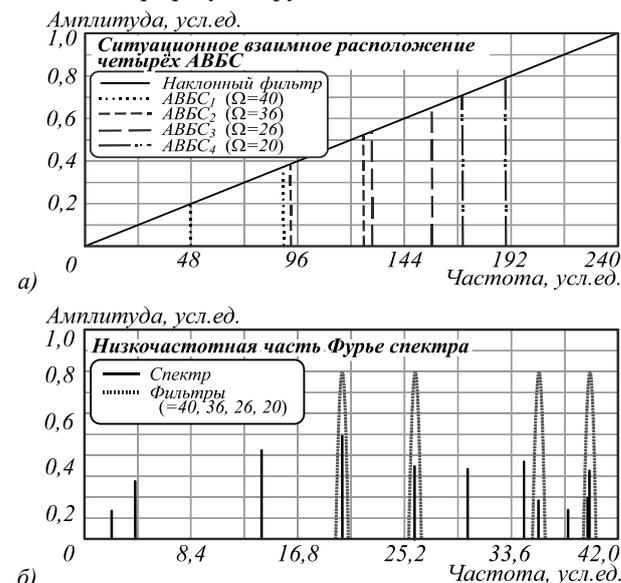


Рис. 6. Ситуационное взаимное расположение четырех АВБС (общий случай)

Решение системы уравнений относительно ω_j при начальных приближениях, заданных по формулам (8), имеет вид:

$$s = \begin{pmatrix} 48,0000 \\ 90,0000 \\ 130,0000 \\ 164,0065 \end{pmatrix}, E = \begin{pmatrix} 2,2450 \cdot 10^{-5} \\ 3,2323 \cdot 10^{-7} \\ 3,9749 \cdot 10^{-7} \\ -6,5192 \cdot 10^{-3} \end{pmatrix}. \quad (9)$$

В (9) s – вектор результатов решения системы уравнений (6), E – вектор абсолютной погрешности вычислений.

Обратим внимание на то, что в качестве начальных значений для реальной измерительной системы можно (и нужно) выбирать те значения положений АВБС, которые были получены на предыдущем расчетном шаге по времени, поскольку скорость измерений гораздо выше скорости изменения измеряемых физических полей.

Как можно видеть из (9), максимальная погрешность нахождения положений центральной частоты АВБС составляет $6,5191 \cdot 10^{-3}$ усл. ед., что в безразмерных параметрах математической модели соответствует физической частоте $\sim 6,5$ МГц. Принимая во внимание, что 1 ГГц соответствует 0,008 нм, получим, что максимальная погрешность определения положения АВБС составляет порядка 0,05 пм.

Интересным является ситуационный случай такого взаимного расположения АВБС в массиве, который образует многократные частоты, равные адресным. Результаты расчетов согласно математической модели показывают, что и в этом случае максимальная погрешность определения положения левой частотной составляющей АВБС составляет не более 0,008 усл. ед. (8 МГц), что в 10–50 раз превышает возможности классических методов определения смещения центральной частоты сенсора.

При численном моделировании была проведена оценка влияния ширины частотного фильтра на результаты измерений. Расположив АВБС таким образом, чтобы в частотной области не возникали кратные частоты и чтобы амплитуды левой и правой частотных составляющих АВБС в массиве не совпадали друг с другом, были созданы условия, чтобы в частотный диапазон одного из адресных частотных фильтров попадала близкая, но не равная ей частота.

На рис. 7 представлены спектрограммы результата фильтрации электрического сигнала после фотоприемника в случае возникновения в системе частот, экстремально близких к адресным частотам АВБС.

Результаты расчетов для данного случая показывают, что и в этом случае максимальная погрешность определения частоты АВБС составит не более 1 усл. ед. (1 ГГц), что приводит к максимальной погрешности определения центральной длины волны АВБС в 8 пм, что можно считать вполне приемлемой точностью.

Выводы

В результате проведенных исследований разработан и предложен новый класс сенсорных систем – ра-

диофотонные сенсорные системы на адресных волоконных брэгговских структурах. Проведенные исследования включали в себя создание концепции, теории и техники адресных волоконных брэгговских структур, разработку принципов построения единого поля волоконно-оптических датчиков и радиофотонную методику обработки измерительной информации. Показано, что применение указанных систем позволяет решить важную научно-техническую проблему – улучшить метрологические и технико-экономические характеристики, а также расширить функциональные возможности существующих радиофотонных сенсорных систем.

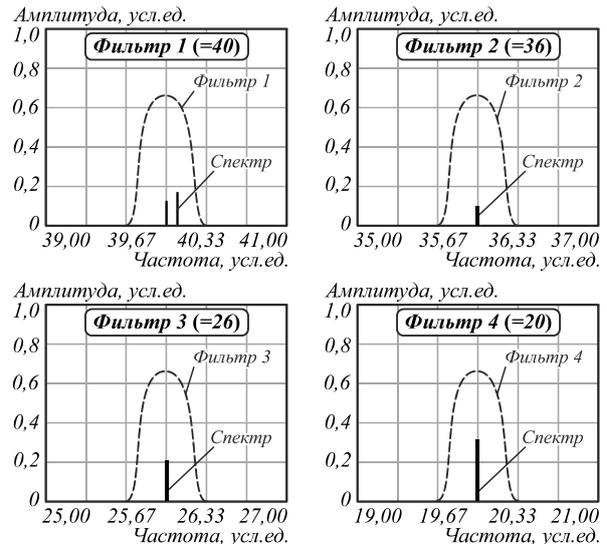


Рис. 7. Результат фильтрации на адресных частотах АВБС при частотах, экстремально близких к адресным

На основе созданной математической модели решена задача однозначного определения центральной (брэгговской) частоты каждой из АВБС в условиях возможного возникновения кратных или дублирующих ложных частот. Предложен подход к уменьшению погрешности измерений, основанный на анализе величины мощности сигнала огибающей на выходе фильтра, отнесенного к его полной мощности на выходе адресной структуры.

Проведены численные и натурные эксперименты, показавшие возможность повышения разрешающей способности проводимых измерений при использовании АВБС в 10–50 раз по сравнению со способами, использующими классические решетки. Например, обеспечить максимальные значения погрешности измерения температуры в 0,1 % и давления в 0,5 % от полной шкалы измерения, что, соответственно, в 2 раза лучше при сравнении со двукратным датчиком температуры и давления на безадресных решетках. Диапазон изменения температур, в котором проводились измерения, составлял 40–150 °С, а диапазон изменения давления – 100–600 атм.

Полученные выигрыши в метрологических характеристиках обусловлены разработкой эффективных процедур математической обработки измерительной информации. В частности, разработаны модели и проце-

дуры однозначного определения адресных частот каждого датчика в мало- и многосенсорных массивах, исключения ложных адресных частот, динамического наблюдения за положением датчиков во времени, трехчастотной асимметричной по амплитуде калибровки, определения параметров адресной структуры для обеспечения заданной точности и диапазона измерений.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки Российской Федерации в рамках государственного задания КНИТУ-КАИ №8.6872.2017/8.9.

Литература

1. **Measures, R.M.** Wavelength demodulated Bragg grating fiber optic sensing systems for addressing smart structure critical issues / R.M. Measures, S. Melle, K. Liu // *Smart Materials and Structures*. – 1992. – Vol. 1, Issue 1. – P. 36-44.
2. **Davis, M.A.** Structural strain mapping using a wavelength/time division addressed fiber Bragg grating array / M.A. Davis, D.G. Bellemore, A.D. Kersey // *Proceedings of SPIE*. – 1994. – Vol. 2361. – P. 342-345.
3. **Matveenko, V.P.** Measurement of strains by optical fiber Bragg grating sensors embedded into polymer composite material / V.P. Matveenko, [et al.] // *Structural Control Health Monitoring*. – 2017. – Vol. 25, Issue 3. – P. 1-11.
4. **Qiao, X.** Fiber Bragg grating sensors for the oil industry / X. Qiao, [et al.] // *Sensors*. – 2017. – Vol. 17, Issue 429. – P. 1-34.
5. **Ma, Z.** Fiber Bragg gratings sensors for aircraft wing shape measurement: Recent applications and technical analysis / Z. Ma, X. Chen // *Sensors*. – 2019. – Vol. 19, Issue 55. – P. 1-25.
6. **Karim, F.** Full Matlab code for synthesis and optimization of Bragg gratings / F. Karim. – Newcastle upon Tyne: Cambridge Scholars Publishing, 2019. – P. 24.
7. **Cormier, G.** Real-coded genetic algorithm for Bragg grating parameter synthesis / G. Cormier, [et al.] // *Journal of the Optical Society of America B*. – 2001. – Vol. 18, Issue 12. – P. 1771-1776.
8. **Li, K.** Review of the strain modulation methods used in fiber Bragg grating sensors / K. Li // *Journal of Sensors*. – 2016. – Vol. 9, Issue 4. – P. 1284520.
9. **Li, R.M.** Addressing fiber Bragg grating sensors with wavelength-swept pulse fiber laser and analog electrical switch / R.M. Li, [et al.] // *Optics Communications*. – 2011. – Vol. 284, Issue 4. – P. 1561-1564.
10. **Town, G.E.** Design and performance of high-speed optical pulse-code generators using optical fiber Bragg gratings / G.E. Town, [et al.] // *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*. – 1999. – Vol. 5, Issue 5. – P. 1325-1331.
11. **Wang, Ch.** Phase-coded millimeter-wave waveform generation using a spatially discrete chirped fiber Bragg grating / Ch. Wang, [et al.] // *IEEE Photonics Technology Letters*. – 2012. – Vol. 24, Issue 17. – P. 1493-1495.
12. **Kacik, D.** Addressing fiber Bragg grating sensor using all-fiber low coherence interferometry / D. Kacik, [et al.] // *Optical Fiber Technology*. – 2013. – Vol. 19. – P. 598-603.
13. **Qi, B.** Reflectometer based on a frequency-shifted interferometer using sideband interference / B. Qi, [et al.] // *Optics Letters*. – 2013. – Vol. 38, Issue 7. – P. 1083-1085.
14. **Koo, K.P.** Fiber-chirped grating Fabry–Perot sensor with multiple-wavelength-addressable free-spectral ranges / K.P. Koo, [et al.] // *IEEE Photonics Technology Letters*. – 1998. – Vol. 10, Issue 7. – P. 1006-1008.
15. **Wei, Z.** New code families for fiber-Bragg-grating-based spectral-amplitude-coding optical CDMA systems / Z. Wei, [et al.] // *IEEE Photonics Technology Letters*. – 2001. – Vol. 13, Issue 8. – P. 890-892.
16. **Kataoka, N.** Phase-shifted superstructured fiber Bragg grating / N. Kataoka, [et al.] // *Fujikura Technical Review*. – 2011. – No. 40. – P. 6-11.
17. **Triana, C.A.** Optical code division multiplexing in the design of encoded fiber Bragg grating sensors / C.A. Triana, [et al.] // *Óptica Pura y Aplicada*. – 2016. – Vol. 49, No. 1. – P. 17-28.
18. **Triana, A.** Interrogation of super-structured FBG sensors based on discrete prolate spheroidal sequences / A. Triana, [et al.] // *Proceedings of SPIE*. – 2017. – Vol. 10231. – P. 102310H.
19. **Djordjevic, I.B.** Design of DPSS based fiber bragg gratings and their application in all-optical encryption, OCDMA, optical steganography, and orthogonal-division multiplexing / I.B. Djordjevic, [et al.] // *Optics Express*. – 2014. – Vol. 22, Issue 9. – P. 10882-10897.
20. **Kim, Y.** A wide dynamics and fast scan interrogating method for a fiber Bragg grating sensor network implemented using code division multiple access / Y. Kim, [et al.] // *Sensors*. – 2012. – Vol. 12. – P. 5888-5895.
21. **Triana, A.** A code division design strategy for multiplexing fiber Bragg grating sensing networks / A. Triana, [et al.] // *Sensors*. – 2017. – Vol. 17, Issue 2508. – P. 1-14.
22. **Yin, H.** Top-hat random fiber Bragg grating / H. Yin, [et al.] // *Optics Letters*. – 2015. – Vol. 40, Issue 15. – P. 3592-3594.
23. **Wang, Z.** Random fiber laser based on weak fiber Bragg grating array / Z. Wang, [et al.] // *Proceedings of SPIE*. – 2018. – Vol. 11048. – P. 110483D.
24. **Deng, H.** High-speed and high-resolution interrogation of a strain and temperature random grating sensor / H. Deng, [et al.] // *Journal of Lightwave Technology*. – 2018. – Vol. 36, Issue 23. – P. 5587-5592.
25. **Liu, J.** A real-time random grating sensor array for quasi-distributed sensing based on wavelength-to-time mapping and time-division multiplexing / J. Liu, P. Lu, S. Mihailov, M. Wang, J.P. Yao // *Optics Letters*. – 2019. – Vol. 44, Issue 2. – P. 379-382.
26. **Curatu, G.** Optical pulse shaping based on a double-phase-shifted fiber Bragg grating / G. Curatu, S. LaRochelle, C. Paré, P.-A. Bélanger // *Proceedings of SPIE*. – 2001. – Vol. 4271. – P. 213-221.
27. **Dai, Y.** Equivalent phase shift in a fiber Bragg grating achieved by changing the sampling period / Y. Dai, X. Chen, D. Jiang, [et al.] // *IEEE Photonics Technology Letters*. – 2004. – Vol. 16, Issue 10. – P. 2284-2286.
28. **Cusano, A.** Photonic band-gap engineering in UV fiber gratings by the arc discharge technique / A. Cusano, A. Iadicicco, D. Paladino, S. Campopiano, A. Cutolo // *Optical Express*. – 2008. – Vol. 16. – P. 15332-15342.
29. **Кузнецов, А.А.** Мультипликативный волоконно-оптический датчик износа и температуры щёток электрических машин : дис. ... канд. техн. наук : 05.11.13 / Кузнецов Артём Анатольевич. – Казань, 2016. – 159 с.
30. **Морозов, О.Г.** Вопросы применения концепции программно-определяемых сетей для систем внутрискважинной волоконно-оптической телеметрии / О.Г. Морозов, И.И. Нуреев, С.В. Феофилактов, [и др.] // *Нелинейный мир*. – 2014. – № 10. – С. 83-90.
31. **Canning, J.** Pi-phase-shifted periodic distributed structures in optical fibers by UV post-processing / J. Canning,

- M.G. Sceats // Electronics Letters. – 1994. – Vol. 30, Issue 16. – P. 1344-1345.
32. **Uttamchandani, D.** Phase shifted Bragg gratings formed in optical fibers by UV fabrication thermal processing / D. Uttamchandani, A. Othonos // Optics Communications. – 1996. – Vol. 127. – P. 200-204.
33. **Jiang, L.** Fabrication of dual-wavelength fiber Bragg grating with a longitudinal stretch / L. Jiang, D.-S. Zhang, W.-
- G. Zhang, [et al.] // Frontiers of Physics in China. – 2006. – Vol. 22, Issue 1. – P. 108-111.
34. **Сахабудинов, А.Ж.** Радиофотонные сенсорные системы на адресных волоконных брэгговских структурах и их применение для решения практических задач : дис. ... доктора техн. наук : 05.11.07 / Сахабудинов Айрат Жавдатович. – Казань, 2018.

Сведения об авторах

Морозов Олег Геннадьевич, д.т.н., профессор, 1960 года рождения, в 1983 году окончил Казанский авиационный институт им. А.Н. Туполева по специальности «Радиотехника», квалификация – «Радиоинженер», работает заведующим кафедрой радиофотоники и микроволновых технологий в ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ». Область научных интересов: микроволновая фотоника; волоконно-оптические сенсоры и системы инеррогации, информационно-измерительные и телекоммуникационные системы оптического и микроволнового диапазонов. E-mail: microoil@mail.ru.

Сахабудинов Айрат Жавдатович, д.т.н., 1973 года рождения, в 1995 году окончил Казанский государственный университет им. В.И. Ульянова-Ленина по специальности «Механика жидкости, газа и плазмы», работает доцентом кафедры радиофотоники и микроволновых технологий в ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ». Область научных интересов: микроволновая фотоника; волоконно-оптические сенсоры и системы инеррогации. E-mail: azhsakhabutdinov@kai.ru.

ГРНТИ: 29.31.26

Поступила в редакцию 25 февраля 2019 г. Окончательный вариант – 8 мая 2019 г.

Addressed fiber Bragg structures in quasi-distributed microwave-photonic sensor systems

O.G. Morozov¹, A.J. Sakhabutdinov¹

¹Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI,
420111, K. Marx str., 10, Russia, Kazan

Abstract

The article describes the theory and technique of addressed fiber Bragg structures and a new class of microwave-photonic sensory systems based thereon, the distinctive feature of which is that the fiber Bragg structure forms two ultra-narrowband frequency components separated by a unique address frequency spacing. The offset of the central frequencies of the Bragg structures is determined via processing a beat signal of the address frequencies on the photodetector, with its parameters making it possible to evaluate the physical fields applied. We formulate and solve a problem of unambiguously determining the central (Bragg) frequency shift of the addressed fiber Bragg structures with unique address frequencies and the same Bragg frequency. These are then combined into a single multi-sensor system with multiplexed response reception on a single photodetector.

Keywords: microwave-photonic sensor systems, fiber Bragg gratings, addressed fiber Bragg structures.

Citation: Morozov OG, Sakhabutdinov AJ. Addressed fiber Bragg structures in quasi-distributed microwave-photonic sensor systems. Computer Optics 2019; 43(4): 535-543. DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-4-535-543.

Acknowledgements: The work was partly funded by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation under the government project No. 8.6872.2017/8.9 of A.N. Tupolev Kazan National Research Technical University (KAI).

References

- [1] Measures RM, Melle S, Liu K. Wavelength demodulated Bragg grating fiber optic sensing systems for addressing smart structure critical issues. Smart Mater Struct 1992; 1(1): 36-44.
- [2] Davis MA, Bellemore DG, Kersey AD. Structural strain mapping using a wavelength/time division addressed fiber Bragg grating array. Proc SPIE 1994; 2361: 342-345.
- [3] Matveenko VP, et al. Measurement of strains by optical fiber Bragg grating sensors embedded into polymer composite material. Struct Control Health Monit 2017; 25(3): 1-11.
- [4] Qiao X. Fiber Bragg grating sensors for the oil industry. Sensors 2017; 17(429): 1-34.
- [5] Ma Z, Chen X. Fiber bragg gratings sensors for aircraft wing shape measurement: Recent applications and technical analysis. Sensors 2019; 19(55): 1-25.

- [6] Karim F. Full Matlab code for synthesis and optimization of Bragg gratings. Newcastle upon Tyne: Cambridge Scholars Publishing; 2019.
- [7] Cormier G, et al. Real-coded genetic algorithm for Bragg grating parameter synthesis. *J Opt Soc Am B* 2001; 18(12): 1771-1776.
- [8] Li K. Review of the strain modulation methods used in fiber Bragg grating sensors. *Journal of Sensors* 2016; 9(4): 1284520.
- [9] Li RM, et al. Addressing fiber Bragg grating sensors with wavelength-swept pulse fiber laser and analog electrical switch. *Opt Commun* 2011; 284(4): 1561-1564.
- [10] Town GE, et al. Design and performance of high-speed optical pulse-code generators using optical fiber Bragg gratings. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* 1999; 5(5): 1325-1331.
- [11] Wang Ch, et al. Phase-coded millimeter-wave waveform generation using a spatially discrete chirped fiber Bragg grating. *IEEE Photon Technol Lett* 2012; 24(17): 1493-1495.
- [12] Kacik D, et al. Addressing fiber Bragg grating sensor using all-fiber low coherence interferometry. *Optical Fiber Technology* 2013; 19: 598-603.
- [13] Qi B, et al. Reflectometry based on a frequency-shifted interferometer using sideband interference. *Opt Lett* 2013; 38(7): 1083-1085.
- [14] Koo KP, et al. Fiber-chirped grating Fabry–Perot sensor with multiple-wavelength-addressable free-spectral ranges. *IEEE Photon Technol Lett* 1998; 10(7): 1006-1008.
- [15] Wei Z, et al. New code families for fiber-Bragg-grating-based spectral-amplitude-coding optical CDMA systems. *IEEE Photon Technol Lett* 2001; 13(8): 890-892.
- [16] Kataoka N, et al. Phase-shifted superstructured fiber Bragg grating. *Fujikura Technical Review* 2011; 40: 6-11.
- [17] Triana CA, et al. Optical code division multiplexing in the design of encoded fiber Bragg grating sensors. *Opt Pura Apl* 2016; 49(1): 17-28.
- [18] Triana A, et al. Interrogation of super-structured FBG sensors based on discrete prolate spheroidal sequences. *Proc SPIE* 2017; 10231: 102310H.
- [19] Djordjevic IB, et al. Design of DPSS based fiber bragg gratings and their application in all-optical encryption, OCDMA, optical steganography, and orthogonal-division multiplexing. *Opt Express* 2014; 22(9): 10882-10897.
- [20] Kim Y, et al. A wide dynamics and fast scan interrogating method for a fiber Bragg grating sensor network implemented using code division multiple access. *Sensors* 2012; 12: 5888-5895.
- [21] Triana A, et al. A code division design strategy for multiplexing fiber Bragg grating sensing networks. *Sensors* 2017; 17(2508): 1-14.
- [22] Yin H, et al. Top-hat random fiber Bragg grating. *Opt Lett* 2015; 40(15): 3592-3594.
- [23] Wang Z, et al. Random fiber laser based on weak fiber Bragg grating array. *Proc SPIE* 2018; 11048: 110483D.
- [24] Deng H, et al. High-speed and high-resolution interrogation of a strain and temperature random grating sensor. *J Lightw Technol* 2018; 36(23): 5587-5592.
- [25] Liu J, Lu P, Mihailov S, Wang M, Yao JP. A real-time random grating sensor array for quasi-distributed sensing based on wavelength-to-time mapping and time-division multiplexing. *Opt Lett* 2019; 44(2): 379-382.
- [26] Curatu G, LaRochelle S, Paré C, Bélanger P-A. Optical pulse shaping based on a double-phase-shifted fiber Bragg grating. *Proc SPIE* 2001; 4271: 213-221.
- [27] Dai Y, Chen X, Jiang D, et al. Equivalent phase shift in a fiber Bragg grating achieved by changing the sampling period. *IEEE Photon Technol Lett* 2004; 16(10): 2284-2286.
- [28] Cusano A, Iadicicco A, Paladino D, Campopiano S, Cutolo A. Photonic band-gap engineering in UV fiber gratings by the arc discharge technique. *Opt Express* 2008; 16: 15332-15342.
- [29] Kuznetsov AA. Multiplicative fiber optic wear and temperature sensor brushes of electrical machines [In Russian]. The thesis for the Candidate's degree in Technical Sciences. Kazan; 2016.
- [30] Morozov OG, Nureev II, Feofilaktov SV, Cherepanov DA. The questions of software-defined networks concept application for downhole fiber optic telemetry systems [In Russian]. *Nonlinear World* 2014; 10: 83-90.
- [31] Canning J, Sceats MG. Pi-phase-shifted periodic distributed structures in optical fibers by UV post-processing. *Electron Lett* 1994; 30(16): 1344-1345.
- [32] Uttamchandani D, Othonos A. Phase shifted Bragg gratings formed in optical fibers by UV fabrication thermal processing. *Opt Commun* 1996; 127: 200-204.
- [33] Jiang L, Zhang D-S, Zhang W-G, et al. Fabrication of dual-wavelength fiber Bragg grating with a longitudinal stretch. *Front Phys China* 2006; 22(1): 108-111.
- [34] Sahabudtinov AZh. Radiophotonic sensor systems on address fiber Bragg structures and their application for solving practical problems. The thesis for the Doctor's degree in Technical Sciences. Kazan; 2014.

Author's information

Oleg Gennadievich Morozov, (b. 1960), doctor of Technical Sciences, Professor, graduated from Kazan Aviation Institute in 1983, majoring in Radio Engineering. Currently he works as the head of Microwave Photonics and Technologies department at FSBEI HE "Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI". Research interests are microwave photonics, fiber-optic sensors and interrogation systems, information-measurement and telecommunication systems of optical and microwave ranges. E-mail: microoil@mail.ru.

Airat Javdatovich Sakhabutdinov, (b. 1973), doctor of Technical Sciences, graduated from Kazan State University named after V.I. Ulyanov-Lenin in 1995, majoring in Mechanics of Fluid, Gas and Plasma. Currently he works as associate professor of Microwave Photonics and Technologies department at FSBEI HE "Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI". Research interests are microwave photonics, fiber-optic sensors and interrogation systems. E-mail: azhsakhabutdinov@kai.ru.

Received February 25, 2019. The final version – May 08, 2019.