

Адресные волоконные брэгговские структуры на основе двух идентичных сверхузкополосных решеток

А.Ж. Сахабутдинов

*Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева-КАИ*

Аннотация: Обладающие многочисленными преимуществами волоконные брэгговские решетки (ВБР) привлекли значительный интерес разработчиков различных оптических систем, включая системы связи со спектральным и кодовым уплотнением, а также волоконно-оптические и радиофотонные сенсорные системы. Сложность и высокая стоимость мультиплексирования и интеррогации комплексированных волоконно-оптических датчиков (КВОД) до сих пор является основным ограничением для широкого внедрения сенсорных систем как распределенного и квази-распределенного, так и точечного типа. В данной статье предложен новый метод мультиплексирования, который использует преимущества как широкополосных волоконно-оптических, так и двухчастотных или полигармонических радиофотонных сенсорных систем. От первых взят простейший широкополосный излучатель, но не используется сложная и дорогая система спектрометрии для определения центральной длины волны ВБР. От вторых взята система регистрации на частоте биений между двумя составляющими, но не используется дорогая система генерации двух- или полигармонических систем зондирования. Параметр мультиплексирования определяется частотой разноса между двумя идентичными сверхузкополосными ВБР, которая отличается на определенную величину у каждого из КВОД и, собственно, формирует его адрес. При этом структуры на основе ВБР остаются чувствительным элементом систем. Таким образом, формируется новый класс чувствительных элементов – адресные волоконные брэгговские структуры (АВБС).

Ключевые слова: радиофотонная сенсорная система, адресная волоконная брэгговская структура, комплексированный волоконно-оптический датчик, интеррогация, мультиплексирование, две идентичные сверхузкополосные волоконные брэгговские решетки, разнос частот, адрес.

Введение

Радиофотонный подход к созданию адресных сенсорных систем [1-3] существенно отличается от принципов оптического кодового мультиплексирования, с помощью которого также пытаются создать кодированные волоконно-оптические сенсорные системы [4]. Основное отличие радиофотонного подхода – требование к главному элементу сенсорной системы – адресной волоконной брэгговской структуре АВБС, которое заключается в том, чтобы оптический отклик от нее содержал бы, как минимум, две узкополосные компоненты в оптическом диапазоне,

аналогично системам с полигармоническим зондированием [5-9]. Разность между спектральным положением компонент составляет частоту, лежащую в радиочастотной области электромагнитных волн, уникальна для каждого комплексированного волоконно-оптического датчика (КВОД) и служит адресом АВБС, а ее амплитудные и частотные параметры несут информацию об измеряемом физическом поле.

Выбрано два теоретических подхода к формированию АВБС с инвариантным расстоянием между ее элементами при наложении измеряемых полей. Первым подходом является использование ВБР с двумя симметричными фазовыми π -сдвигами (2π -ВБР), которое достаточно полно описано в [3], а вторым – использование двух идентичных разнесенных по длине волны сверхузкополосных ВБР (2λ -ВБР), которые и составили основной предмет настоящей статьи, наравне с вопросами их опроса и мультиплексирования.

Обратное преобразование Фурье как инструмент синтеза двух идентичных сверхузкополосных решеток (2λ -ВБР)

В различных системах требуется применение различных по спектральным характеристикам решеток. Например, прямоугольные решетки могут быть разработаны для реализации полосового фильтра с плоской вершиной и узкой полосой пропускания [10]. Линейно изменяющиеся фронты и простая треугольная ВБР могут найти применение в системах определения центральной длины волны и в датчиках с особыми условиями эксплуатации, например, для климатических испытаний [11-15]. Указанные ВБР имеют свои особые преимущества. Среди различных методов синтеза ВБР обратное преобразование Фурье (ОПФ) успешно применяется в случаях, когда определяющими функциями являются период и глубина модуляции показателя преломления (ПП) волокна [14].

Как правило, ОПФ состоит из определения параметров амплитуды и фазы ПП, которые могут быть разделены и нанесены на сердцевину волокна независимо. Идея образования произвольной спектральной формы ВБР основана на том факте, что коэффициент модуляции ВБР является обратным Фурье-преобразованием спектра отражения решетки.

Профиль ожидаемого спектра можно приблизительно описать математически функцией, например, треугольника (рис.1).

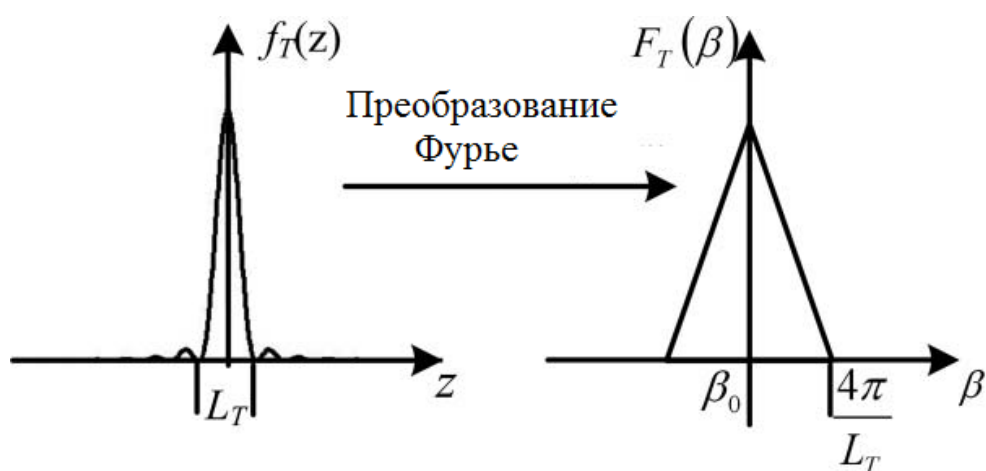


Рис.1. – Схематичное представление преобразования Фурье для треугольной формы спектра ВБР

Обратным преобразованием Фурье можно задать амплитуду ПП для определения его коэффициента модуляции. Как правило, после ОПФ получим дискретную фазу, также можем построить фазовую модуляцию ПП вдоль оси, которая является оптической осью в волокне. Таким образом, связь между профилем контура ВБР и огибающей коэффициента модуляции ПП волокна выражается соотношением:

$$F(z) \exp(j\theta) = \int_{-\infty}^{\infty} F_{\beta} \exp(j\beta z) d\beta, \quad (1)$$

где β – пространственной частота, z – координата вдоль длины волокна, $F(z)$ – коэффициент модуляции огибающей, θ – фаза модуляции в ВБР

(в симметричной четной решетке это константа), F_β – спектральная форма. Задав спектральную форму F_β , с помощью ОПФ получаем зависимость интенсивности модуляции $F(z)$ ПП вдоль волокна.

Коэффициент отражения ВБР может быть представлен следующим соотношением:

$$n(z) = n_0 + \Delta n_{AC}(z) \exp\left(\frac{2\pi z}{\Lambda} j\right) + \Delta n_{DC}(z), \quad (2)$$

где n_0 – эффективный коэффициент преломления; Δn_{AC} и Δn_{DC} – коэффициенты модуляции показателя преломления; Λ – период решетки. Для переменной составляющей можно записать:

$$\Delta n_{AC}(z) = \left[f(z) \sum_{i=-\infty}^{\infty} \delta(z - iL_s) g(z) \right] \exp\left(\frac{2\pi z}{\Lambda} j\right), \quad (3)$$

где: $f(z)$ – функция опроса; $g(z)$ – функция профиля ВБР; L_s – период опроса.

Подвергнув функция $\Delta n_{AC}(z)$ преобразованию Фурье, получим:

$$K(\beta) = F(\beta) \left[G(\beta) \sum_{i=-\infty}^{\infty} \delta\left(\beta - \beta_0 - \frac{2\pi}{L_s} i\right) \right], \quad (4)$$

где: $b_0 = 2\pi/\Lambda$; $F(\beta)$ и $G(\beta)$ – Фурье-функции $f(z)$ и $g(z)$, соответственно;

Если фазовый сдвиг приложен между каждой исследуемой ВБР, то результирующий спектр будет представлен как:

$$K(\beta) = F(\beta) \left[G(\beta) \sum_{i=-\infty}^{\infty} \delta\left(\beta - \beta_0 - \frac{2\pi}{L_s} i - \frac{\alpha}{L_s}\right) \right], \quad (5)$$

и показан на рис.2, для случаев модуляции прямоугольным (а) и косинусным (b) сигналами.

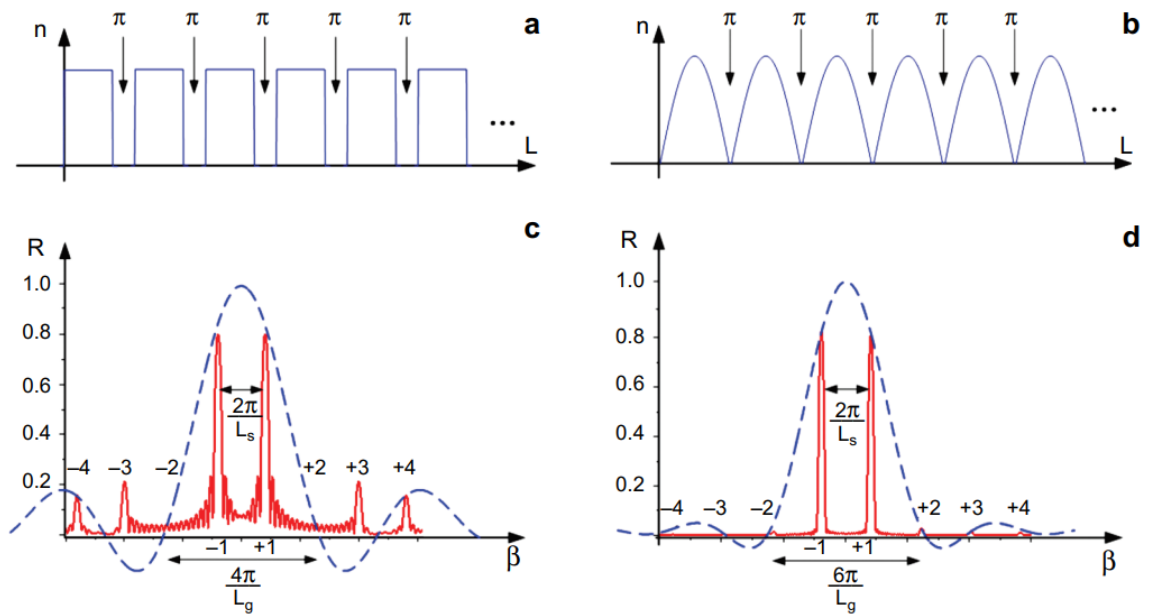


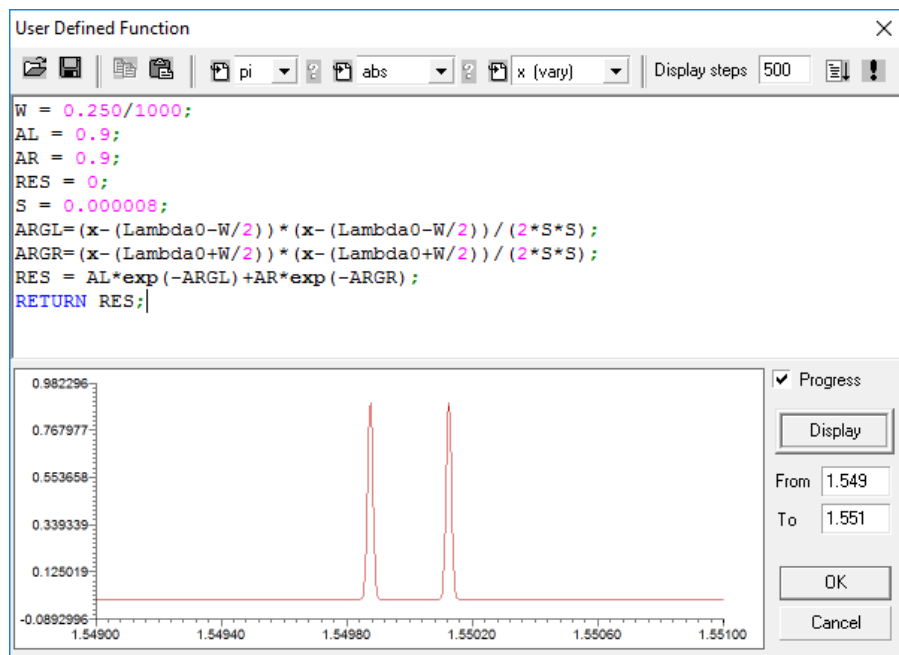
Рис.2. – Моделирование ВБР прямоугольным (а) и косинусным (b) сигналами и соответствующие спектры отражения (c) и (d)

Моделирование адресной 2λ -ВБР структуры в среде OptiGrating

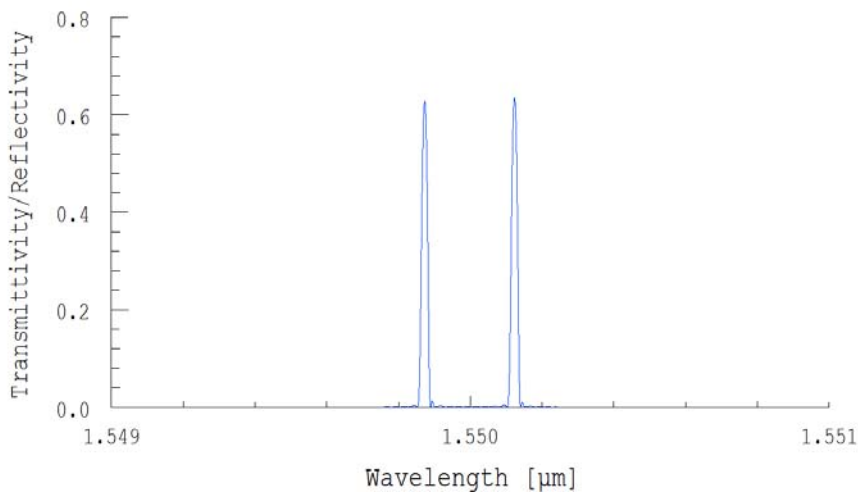
Задав необходимую спектральную форму 2λ -ВБР, получим параметры конструирования ВБР с двумя определенными частотными откликами вместо одного. Для моделирования 2λ -ВБР структуры использовался программный пакет OptiGrating 4.2 с привлечением алгоритма решения обратной задачи формирования формы ВБР с заданными спектральными характеристиками.

Зададим искомую спектральную форму 2λ -ВБР, позволяющую получить на отражение двухчастотное излучение с разностной адресной частотой 31.25 ГГц (250 пм). Каждую брэгговскую составляющую промоделируем гауссовой кривой. На рис.3,а приведен требуемый спектр 2λ -ВБР структуры, а в верхней части окна рисунка математически описано уравнение ее профиля. Результирующий спектральный профиль 2λ -ВБР структуры приведен на рис.3,б.

Отметим, что требуемый и реальный спектры 2λ -ВБР никогда не будут совпадать между собой полностью.



a)



б)

Рис.3. – Моделирование 2λ -ВБР структуры:
требуемая спектральная характеристика (а)
и полученная спектральная характеристика при длине структуры 70 мм (б)

В ходе исследовательской работы не удалось добиться результатов моделирования 2λ -ВБР структуры с шириной линий спектральных откликов близкой к тем, которые достижимы в 2λ -ВБР структурах. Ширина спектральных линий отклика 2λ -ВБР структуры имеет слабо коррелирующую зависимость с длиной моделируемой 2λ -ВБР. Вместе с тем, увеличение длины моделируемой 2λ -ВБР структуры так и не приводит к

существенному уменьшению спектральной ширины линий отклика, а применение длинных (более 50–70 мм) чувствительных элементов в технике довольно затруднительно, хотя и может быть использовано для решения своего класса задач.

Спектральная характеристика 2λ -ВБР структуры, приведенная на рисунке 3, соответствует длине 2λ -ВБР 70 мм с количеством сегментов и шагов моделирования 2000. Меняя параметры моделирования проектируемой 2λ -ВБР структуры можно добиться ширины спектральной линии порядка 1–2 ГГц, что приведет к соответствующей ширине спектрального отклика адресной частоты 2λ -ВБР структуры после фотоприемника. Ширина спектральной линии 1–2 ГГц в 3–10 раз превышает спектральную чувствительность частотного фильтра. Однако при реальной записи были получены полосы пропускания на полувысоте решетки около 250 МГц.

На рис.4,*a-в* приведены графики профиля 2λ -ВБР структуры, ее фазы и кривой аподизации соответственно. Меняя расстояние между двумя спектральными составляющими в требуемой форме 2λ -ВБР можно получить массив таких адресных 2λ -ВБР структур с требуемой адресацией.

Формирование массива

адресных волоконных брэгговских структур

Для построения 2λ -ВБР структуры будем использовать оптическое волокно с характеристиками серийно выпускаемого оптического волокна SMF-28. Длины однородных участков волокна для первого и третьего сегментов зафиксируем и примем равными 554.78 мкм, количество сегментов каждого однородного участка будет равным 100, величина наведенного показателя преломления 0.007, период решетки 0.528 мкм.

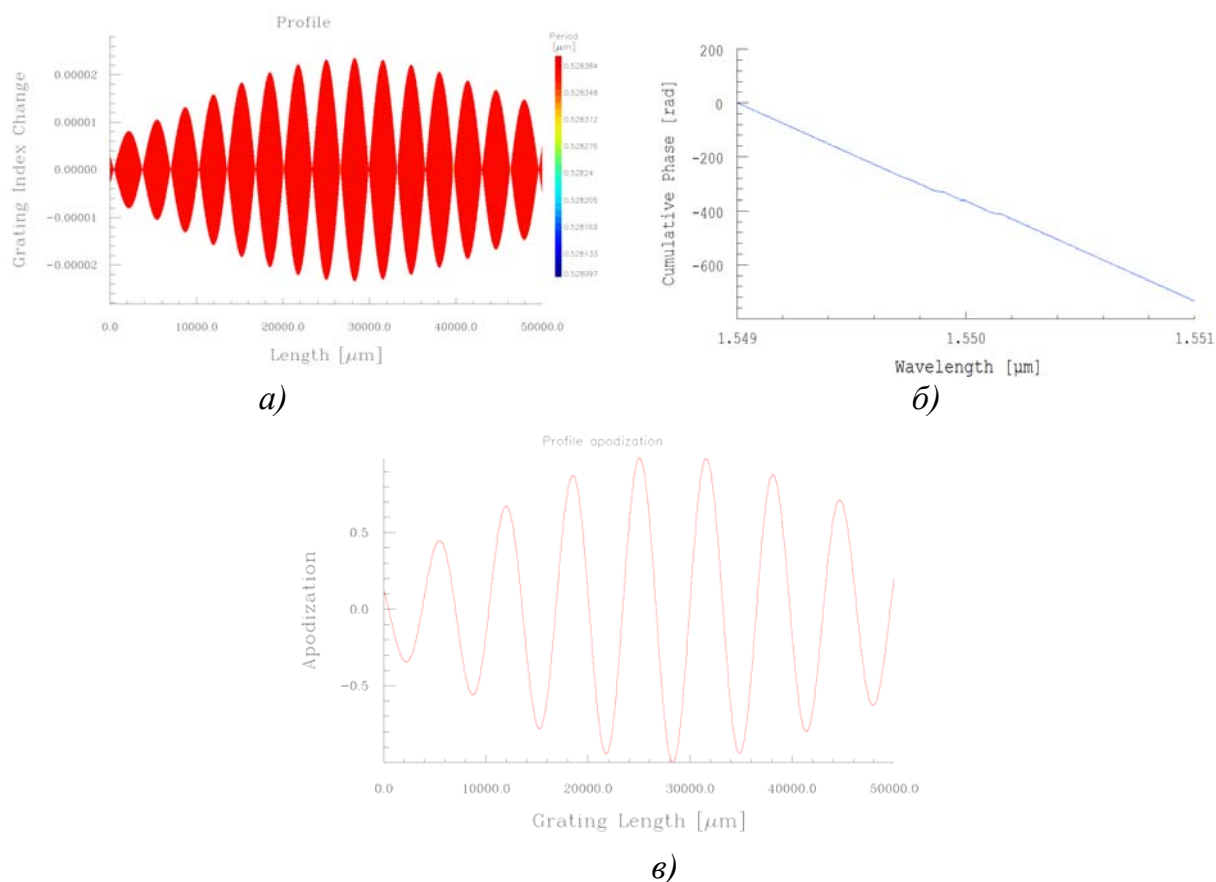


Рис.4. – Результат моделирования спектрального отклика 2λ -ВБР структуры: структура ПП 2λ -ВБР (а), фазы (б) и аподизации (в)

Для каждого однородного участка была выбрана аподизация наведенного показателя преломления кривой гаусса с параметром 0.5. Длина среднего сегмента адресной 2π -ВБР структуры изменялась в диапазоне от 360 до 260 мкм, с автоматической коррекцией длины.

Был проведен расчет формы 2π -ВБР структуры для 28 различных значений длины среднего сегмента и исследована величина между фазовыми сдвигами для каждого значения длины среднего сегмента (рис.5).

Для конкретных параметров моделирования 2π -ВБР по методу наименьших квадратов была построена аппроксимирующая кривая третьего порядка, зависимости длины центрального сегмента 2π -ВБР структуры от разностной частоты между двумя фазовыми π -сдвигами.

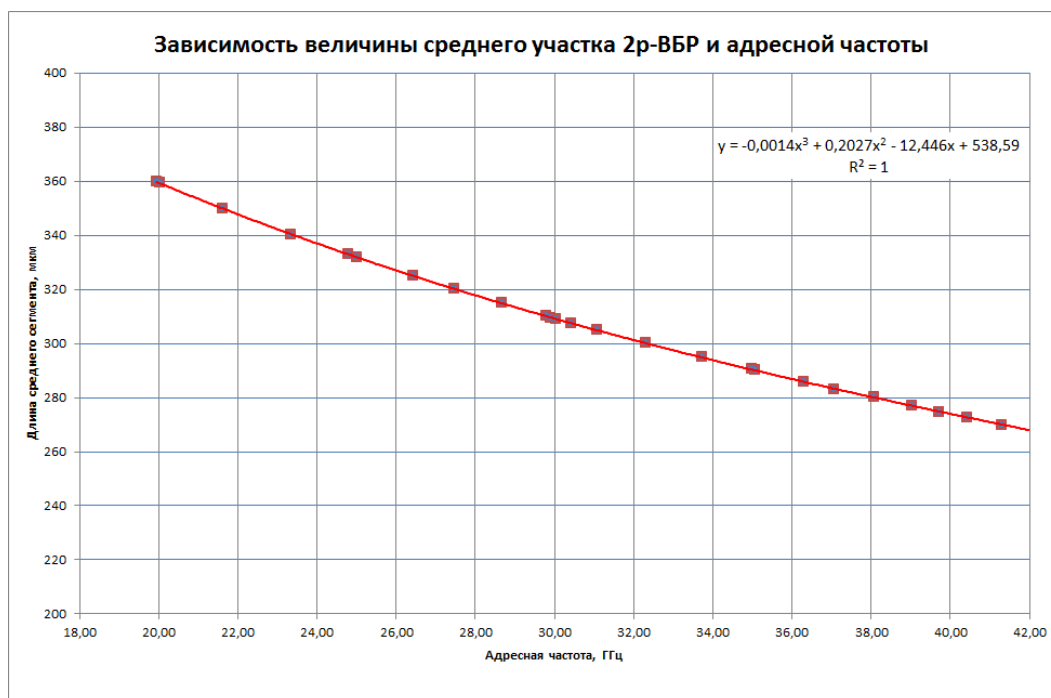


Рис.5. – Зависимость длины центрального сегмента 2π -ВБР от разностной (адресной частоты) между двумя фазовыми π -сдвигами

Что позволяет сформировать профиль 2π -ВБР структуры с любой наперед заданной адресной разностной частотой между двумя фазовыми π -сдвигами. При этом, общая ширина 2π -ВБР структуры остается в пределах 6–7 нм, что сохраняет возможность использования ее в качестве чувствительного элемента адресной измерительной системы.

Таким образом, на основе математической модели матриц передачи и моделирования в программном пакете OptiGrating 4.2, подтверждена техническая возможность создания 2π -ВБР структуры с близкой к прямоугольной широкой формой профиля в амплитудно-частотной плоскости и разносом частот между фазовыми π -сдвигами порядка 20–40 ГГц и толщиной спектральной линии фазового π -сдвига порядка 25–100 МГц.

Преимуществом 2λ -ВБР является то, что она может быть использована при работе на отражение сигнала и не накладывает дополнительных ограничений, связанных с большим количеством таких решеток на отражение вдоль одного участка волокна. Недостатком такой адресной АВБС

структуры является то, что спектральная ширина составляющих их двухчастотного отклика на два порядка больше спектральной ширины 2π -ВБР.

Максимальная величина адреса любой адресной АВБС структуры (и 2π -ВБР, и 2λ -ВБР) не превышает, согласно практическим рекомендациям, данным в предыдущей главе, связанным с техническими возможностями обработки сигнала биений на фотоприемнике, 40 ГГц. Минимальная величина адреса, согласно тем же рекомендациям, равна 20 ГГц. Ширина спектральных линий в адресных 2λ -ВБР структурах составляет 0,25 ГГц. Что влечет за собой снижение количества одновременно используемых датчиков на базе адресных 2λ -ВБР структур до 5–6 штук на одной длине волны с учетом не перекрытия диапазонов. Одновременно с этим необходимо в математической модели производить учет спектральной ширины линий излучения 2λ -ВБР в общий вклад биений. Вместе с тем, даже при этих условиях идея применения адресных 2λ -ВБР структур в измерительных системах имеет право на существование для их представителей, не требующих прецизионной точности измерений, например инерционных систем для измерения температуры [16] и биосенсоров для определения ДНК [17-19] или качества топлива в хранилищах [20].

Методика опроса адресных 2λ -ВБР структур

Обозначим требования к измерительной системе и профилю 2λ -ВБР, которые позволят использовать 2λ -ВБР структуру (или массив 2λ -ВБР структур) в качестве чувствительных элементов измерительной системы, построенной на их основе. Во-первых, необходимо обеспечить возможность опроса характерной особенности 2λ -ВБР структуры (частот двух идентичных сверх узкополосных ВБР) на всем диапазоне хождения датчика. Во-вторых,

чтобы в область исследования попадал световой отклик только от частот фазовых π -сдвигов 2λ -ВБР.

Выполнение первого требования обеспечим за счет применения сверхузкополосности 2λ -ВБР. Второе требование метода заключается в том, чтобы в область опроса попадал свет только от частот двух идентичных сверхузкополосных λ -ВБР структур. Использование источника лазерного излучения с частотным диапазоном равным диапазону хождения датчика или использования полосового оптического фильтра, пропускающего только требуемый диапазон частот, позволит избежать попадания постороннего, – не от частот двух идентичных сверх узкополосных 2λ -ВБР структур, – излучения в область анализа сигнала. Это условие необходимо для того, чтобы на всем диапазоне измерений, на фотоприемник попадало излучение только от частот самих решеток 2λ -ВБР. В качестве полосового фильтра с успехом может быть использована широкая волоконная брэгговская решетка с формой близкой к прямоугольной в амплитудно-частотной плоскости, наложенная непосредственно после источника лазерного излучения. Техническая возможность моделирования ВБР с заданной формой спектра хорошо изложена в работах [12, 14]. Таким образом, выполняется и вторая половина первого требования метода.

Заключение

Основной задачей, решенной в данной статье, явилась задача формирования концепции адресных волоконных брэгговских структур на двух идентичных разнесенных по длине волны сверхузкополосных ВБР (2λ -ВБР). Данная концепция основана на радиофотонном подходе, который заключается в том, чтобы оптический отклик от нее содержал бы, как минимум, две узкополосные компоненты в оптическом диапазоне. Разность между спектральным положением компонент составляет частоту, лежащую в

радиочастотной области электромагнитных волн, и служит адресом АВБС, а ее амплитудные и частотные параметры несут информацию об измеряемом физическом поле. По первому параметру осуществляется мультиплексирование КВОД на основе АВБС, по второму и третьему их опрос как сенсорных элементов.

Более детально результаты выглядят следующим образом.

На основе метода обратного преобразования Фурье построена математическая модель профиля показателя преломления оптического волокна для формирования адресной 2λ -ВБР структуры с двумя идентичными спектральными откликами на разнесенных длинах волн. В качестве исходных параметров для построения математической модели задавались желаемый спектральный профиль адресной 2λ -ВБР структуры, включая коэффициент отражения и ширину полосы пропускания ее двух идентичных сверх узкополосных решеток и величину разноса между ними. На основе исследования математической модели показана возможность подбора необходимых параметров ПП оптического волокна и законов его модуляции, позволяющих сформировать спектральный профиль адресных 2λ -ВБР структур таким образом, чтобы они могли быть использованы в качестве чувствительного элемента КВОД.

На основе компьютерного моделирования в программном пакете OptiGrating 4.2 (метод матриц передач), подтверждена техническая возможность создания адресных 2λ -ВБР структур и получения разноса частот порядка 20–40 ГГц и шириной спектральной линии решетки порядка 200 МГц.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства образования и науки РФ, программа «Асимметрия», № 8.6872.2017/8.9.

Литература

1. Gasulla I., Capmany J. Analytical model and figures of merit for filtered microwave photonic links // *Opt. Express*. 2011. V. 19, no. 20. pp. 19758-19774.
 2. Capmany J., et al. Innovative Concepts in Microwave Photonics // *Waves*. 2012. no. 4. pp. 43-58.
 3. Мисбахов Р.Ш. и др. Волоконные брэгговские решетки с двумя фазовыми сдвигами как чувствительный элемент и инструмент мультиплексирования сенсорных сетей // *Инженерный вестник Дона*. 2017. № 3. URL:ivdon.ru/magazine/archive/n3y2017/4343.
 4. Triana A., Pastor D. Interrogation of super-structured FBG sensors based on discrete prolate spheroidal sequences // *Proc. SPIE*. V. 10231. P. 102310H.
 5. Aybatov D.L., Morozov O.G., Sadeev T.S. Dual port MZM based optical comb generator for all-optical microwave photonic device // *Proc. of SPIE*. 2011. V. 7992. P. 799202.
 6. Natanson O.G., et al. Development problems of frequency reflectometry for monitoring systems of optical fiber structures // *Proc. of SPIE*. 2005. V. 5854. pp. 215-223.
 7. Il'in G.I., Morozov O.G., Il'in A.G. Theory of symmetrical two-frequency signals and key aspects of its application // *Proc. of SPIE*. 2014. V. 9156. P. 91560M.
 8. Morozov O.G. RZ, CS-RZ and soliton generation for access networks applications: problems and variants of decisions // *Proc. of SPIE*. 2012. V. 8410. P. 84100P.
 9. Морозов О.Г. и др. Модуляционные методы формирования спектрально чистого двухканального полигармонического излучения с одинаковой разностной частотой и поляризационным мультиплексированием. Постановка задачи // *Инженерный вестник Дона*. 2017. № 4. URL:ivdon.ru/magazine/archive/n4y2017/4587.
-

10. Xu O., Zhang J., Yao J. High speed and high resolution interrogation of a fiber Bragg grating sensor based on microwave photonic filtering and chirped microwave pulse compression // Optics Letters. V. 41, no. 21. pp. 4859-4862.

11. Нуреев И.И. Радиофотонные амплитудно-фазовые методы интеррогации комплексированных датчиков на основе волоконных решеток Брэгга // Инженерный вестник Дона. 2016. № 2. URL:ivdon.ru/magazine/archive/n2y2016/3581.

12. Нуреев И.И. Сенсорные пассивные оптические сети и ключевые вопросы применения в них волоконных брэгговских решеток // Инженерный вестник Дона. 2016. № 2. URL:ivdon.ru/magazine/archive/n2y2016/3605.

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

14. Нуреев И.И. Радиофотонные полигармонические системы интеррогации комплексированных датчиков на основе волоконных брэгговских решеток. Часть 2. Единое поле комплексированных датчиков // Прикладная фотоника. 2016. Т. 3. № 3. С. 221-251.

15. Нуреев И.И. Радиофотонные полигармонические системы интеррогации комплексированных датчиков на основе волоконных брэгговских решеток. Часть 3. Полигармонические системы интеррогации комплексированных волоконно-оптических датчиков // Прикладная фотоника. 2017. Т. 4. № 2. С. 139-170.

16. Сахабутдинов А.Ж. и др. Процедура решения задач калибровки совмещенных датчиков давления и температуры // Нелинейный мир. 2015. Т. 13. № 8. С. 32–38.

17. Сахабутдинов А.Ж. и др. Характеризация резонанса Фано в оптических биосенсорах рефрактометрического типа на основе кольцевых

волоконных брэгговских решеток с π -сдвигом. Постановка задач моделирования // Инженерный вестник Дона. 2018. № 2. URL:ivdon.ru/magazine/archive/n2y2018/5002.

18. Sadykov I.R., Morozov O.G., Sadeev T.S. The biosensor based on fiber Bragg grating to determine the composition of the fuel and biofuel // Proc. of SPIE. 2012. V. 8410. P. 84100F.

19. Stepustchenko O.A., et al. Optical refractometric FBG biosensors: problems of development and decision courses // Proc. of SPIE. 2011. V. 7992. P. 79920D.

20. Насыбуллин А.Р., Вазиев Т.О., Морозов О.Г. Формирование резонанса Фано в микрополосковой СВЧ структуре // Инженерный вестник Дона. 2017. № 4. URL:ivdon.ru/magazine/archive/n4y2017/4451.

References

1. Gasulla I., Capmany J. Opt. Express. 2011. V. 19, no. 20. pp. 19758-19774.
 2. Capmany J., et al. Waves. 2012. no. 4. pp. 43-58.
 3. Misbakhov R.Sh, J., et al. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2017, № 3. URL:ivdon.ru/magazine/archive/n3y2017/4343.
 4. Triana A., Pastor D. Proc. SPIE. V. 10231. P. 102310H.
 5. Aybatov D.L., Morozov O.G., Sadeev T.S. Proc. of SPIE. 2011. V. 7992. P. 799202.
 6. Natanson O.G., et al. Proc. of SPIE. 2005. V. 5854. pp. 215-223.
 7. Il'in G.I., Morozov O.G., Il'in A.G. Proc. of SPIE. 2014. V. 9156. P. 91560M.
 8. Morozov O.G. Proc. of SPIE. 2012. V. 8410. P. 84100P.
 9. Morozov O.G., et al. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2017, № 4. URL:ivdon.ru/magazine/archive/n4y2017/4587.
-



10. Xu O., Zhang J., Yao J. Optics Letters. V. 41, no. 21. pp. 4859-4862.
11. Nureev I.I. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2016, № 2. URL:ivdon.ru/magazine/archive/n2y2016/3581.
12. Nureev I.I. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2016, № 2. URL:ivdon.ru/magazine/archive/n2y2016/3605.
13. Nureev I.I. Prikladnaya fotonika. 2016. V. 3. № 3. pp. 193-220.
14. Nureev I.I. Prikladnaya fotonika. 2016. V. 3. № 3. pp. 221-251.
15. Nureev I.I. Prikladnaya fotonika. 2017. V. 4. № 2. pp. 139-170.
16. Sakhabutdinov A.Zh., et al. Nelinejnyj mir. 2015. V. 13. № 8. pp. 32–38.
17. Sakhabutdinov A.Zh., et al. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2018, № 2. URL:ivdon.ru/magazine/archive/n2y2018/5002.
18. Sadykov I.R., Morozov O.G., Sadeev T.S. Proc. of SPIE. 2012. V. 8410. P. 84100F.
19. Stepustchenko O.A., et al. Proc. of SPIE. 2011. V. 7992. P. 79920D.
20. Nasibullin A.R., Vaziev T.O., Morozov O.G. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2017, № 4. URL:ivdon.ru/magazine/archive/n4y2017/4451.