

СИНТЕЗ ПРОФИЛЯ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ ВОЛНОВЫХ И ФАЗОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОМБИНИРОВАННЫХ АДРЕСНЫХ ВОЛОКОННЫХ БРЭГГОВСКИХ СТРУКТУР С ГЕОМЕТРИЧЕСКИ ЛИНЕЙНЫМ СПЕКТРОМ КАК СЕНСОРОВ «ФОТОННОЙ КОЖИ»

*И.И. Нуреев, А.Ж. Сахабутдинов, Р.А. Юсупов,
Рус. Ш. Мисбахов, Ш.Р. Юсупов, Л.Н. Ибрагимова, Р.М. Муратов*

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

Аннотация. Комбинированные адресные волоконные брэгговские структуры (КАВБС) представляют собой разновидность АВБС, спектральная характеристика которых состоит из двух узкополосных отражающих (волновых) или пропускающих (фазовых) составляющих волоконных брэгговских решеток (ВБР), или их комбинации, разнесенных на определенную частоту, лежащую в радиодиапазоне, которая называется адресной и неизменна при любых внешних воздействиях. Как правило, в практике сенсорных систем промышленного мониторинга рассматриваются и применяются составляющие с гауссовыми отражающими и лоренцевыми пропускающими профилями спектра. Применение КАВБС в составе «фотонной кожи» (чувствительных оптических покрытий для робототехники, протезов или медицинского и спортивного мониторинга) связано с созданием высокоточных сенсорных сетей для измерения деформаций, давления и температуры. Для решения этих задач требуются волновые и фазовые составляющие КАВБС с геометрически линейным профилем спектра, которые представляют собой треугольные, прямоугольные и трапециевидные ВБР, причем с фазовым π -сдвигом, имеющим также геометрически линейный профиль спектра. В данной работе рассмотрены вопросы синтеза профиля показателя преломления волновых и фазовых элементов КАВБС – ВБР – с геометрически линейным спектром как сенсоров «фотонной кожи».

Ключевые слова: спортивная инженерия, «фотонная кожа», комбинированная адресная волоконная брэгговская структура, волновая отражающая волоконная брэгговская решетка, фазовая пропускающая волоконная брэгговская решетка с фазовым π -сдвигом, обратное преобразование Фурье, синтез профиля показателя преломления ВБР с геометрически линейным спектром, треугольный, прямоугольный, трапециевидный спектр

Введение

Треугольный, прямоугольный или трапециевидный профиль спектра отражения или пропускания определяет ключевые эксплуатационные преимущества ВБР в классических сенсорных системах [1]. Например, прямоугольные решетки могут быть разработаны для реализации полосового фильтра с плоской вершиной и узкой полосой пропускания [2]. Линейно изменяющиеся фронты трапециевидных ВБР и простая треугольная ВБР могут найти применение в интеррогаторах и в датчиках с особыми условиями эксплуатации, например, для климатических испытаний [3-4]. Прямое преобразование «длина волны — интенсивность» в треугольных ВБР (ТРГ-ВБР) с выраженными линейными склонами спектра отражения (в дБ) используются в качестве оптических фильтров-дискриминаторов.

При контроле деформации в системах «фотонной кожи» [5-7] центральная длина волны сдвигается, а линейный склон треугольного профиля мгновенно преобразует этот

сдвиг в изменение интенсивности светового сигнала на фотодетекторе. Это исключает необходимость в дорогих и массивных спектроанализаторах, позволяя использовать простые фотодиоды. Простая треугольная или трапецевидная (ТРП-ВБР) форма спектра обеспечивает строго линейную зависимость выходного сигнала от приложенного механического напряжения, что критично для имитации осязания «кожи» в реальном времени. Прямоугольная ВБР (ПРГ-ВБР) является определяющей для зоны контроля воздействий и определяет его границы для контроля выхода значений деформаций или температур из заданного уровня нагрузки для спортсмена.

Использование треугольных, прямоугольных или трапецевидных функций для модуляции показателя преломления (аподизации) вдоль решетки позволяет эффективно подавлять боковые лепестки в спектре отражения. В задачах «фотонной кожи» это радикально повышает разрешающую способность сенсоров и снижает уровень перекрестных помех между соседними чувствительными элементами («пикселями кожи»), объединенными в единую матрицу.

На базе таких решеток формируются АВБС [8-12] или КАВБС [13-14]. Например, ТРГ-ВБР может выступать в роли опорного контура или оптического дискриминатора, который модулирует амплитуды частотных откликов от нескольких датчиков деформации кожи одновременно. Это позволяет осуществлять параллельный опрос сотен сенсорных точек на теле робота или спортсмена по одному оптическому волокну с использованием радиофотонных методов обработки.

Чтобы превратить массив КАВБС в полноценную «фотонную кожу», способную распознавать распределенное пространственное давление, сигналы нужно правильно демодулировать. Для них лучше всего подходят три метода интеррогации:

- метод межспектральной фильтрации (ратиометрическая интеррогация) – самый эффективный и дешевый метод для «фотонной кожи», исключающий дорогие спектрометры. Отраженный от КАВБС сигнал разделяется на два канала с помощью разветвителя. Один канал идет на обычный фотодиод (опорный сигнал мощности), а второй пропускается через ТРГ-ВБР, работающую как фильтр, и падает на второй фотодиод. Далее вычисляется отношение сигналов, которое линейно зависит от деформации и полностью очищено от флуктуаций мощности источника излучения или изгибов подводящего кабеля;

- метод АВБС (радиофотонная интеррогация) - используется, когда на небольшом участке «фотонной кожи» размещены десятки датчиков последовательно. Каждой КАВБС при изготовлении задается своя индивидуальная адресная частота. При подаче оптического излучения в волокно отраженные сигналы от разных участков кожи генерируют биения на уникальных радиочастотах. С помощью одного высокоскоростного фотоприемника и аналого-цифрового преобразователя метод позволяет разделять сигналы от каждой КАВБС «фотонной кожи» по их уникальной радиочастоте в режиме реального времени;

- метод спектрально-временного мультиплексирования (оптоэлектронная интеррогация) – КАВБС записываются на разных центральных длинах волн вдоль одного волокна. Опрос производится перестраиваемым лазером, который быстро сканирует заданный диапазон частот. Метод позволяет точно определять координаты и силу нажатия на кожу, разделяя датчики во временной области (по времени прихода отраженного импульса) или частотной области, но является самым дорогим.

Оптимальным решением является объединение двух первых методов, которые характеризуются высокой частотой опроса (радиофотоника) и исключительно высокой точностью измерений (ратиометрия).

Вторая важная задача реализации «фотонной кожи» – синтез ВБР с геометрически линейным спектром. Среди различных методов синтеза ВБР преобразование Фурье успешно применяется в случаях, когда определяющими функциями являются период и глубина модуляции показателя преломления волокна [4].

Идея образования геометрически линейной спектральной формы ВБР основана на том факте, что коэффициент модуляции показателя преломления и его амплитудные и фазовые изменения вдоль ВБР являются обратным Фурье-преобразованием спектра отражения решетки.

Таким образом, связь между профилем контура ВБР и огибающей коэффициента модуляции показателя преломления волокна выражается соотношением:

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

где β – пространственная частота, z – координата вдоль длины волокна, $F(z)$ – коэффициент модуляции огибающей, θ – фаза модуляции огибающей в ВБР (в симметричной четной решетке – это константа), F_{β} – требуемая спектральная форма ВБР.

Задав спектральную форму F_{β} , обратным преобразованием Фурье получаем зависимость интенсивности $F(z)$ и фазы θ модуляции показателя преломления волокна в зоне ВБР. Рассмотрим некоторые частные случаи построения форм геометрически линейных спектральных профилей ВБР как волновых элементов КАВБС – сенсоров «фотонной кожи».

1. Синтез волновых элементов КАВБС с линейными склонами

Волновые элементы КАВБС с треугольной формой спектра. Опираясь на метод, описанный выше, мы можем получить волновую ВБР с треугольной формой спектра (В-ТРГ-ВБР). Зададим внешний вид спектра В-ТРГ-ВБР симметричным соотношением:

$$\Phi(\lambda) = \begin{cases} A - \frac{A}{2W}|\lambda|, & \lambda \in (-W, W) \\ 0, & \lambda \notin (-W, W) \end{cases}, \quad (2)$$

где A – амплитуда (высота), а W – ширина (основание) треугольника. Спектр В-ТРГ-ВБР приведен на рис. 1. Исходя из данных на нем, можно говорить о полном совпадении формы контуров требуемого и рассчитанного по (1).

Огибающая коэффициента преломления описывается стандартной формулой преобразования Фурье, выраженной через z :

$$F(z) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \int_0^{\infty} \Phi(\lambda) \cdot \cos(z\lambda) d\lambda. \quad (3)$$

Огибающая коэффициента преломления волокна в зоне ВБР с треугольной формой спектра представлена на рис. 2. На рис. 3 приведен коэффициент амплитудной модуляции огибающей двухчастотного зондирующего излучения треугольной ВБР в безразмерных величинах [15-23]. При меньшем разnose частот зондирования зона линейной зависимости коэффициента амплитудной модуляции становится шире примерно на 35%.

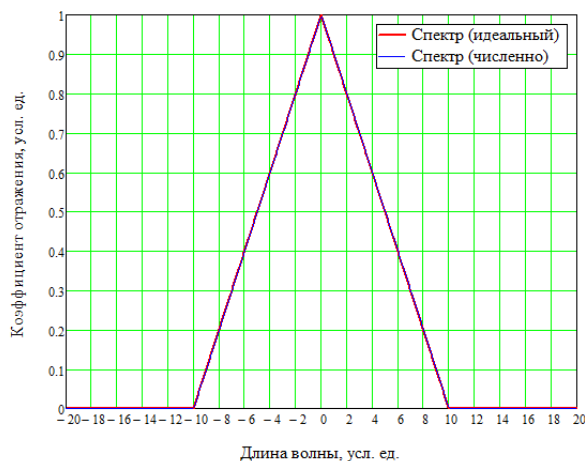


Рис. 1. Спектр ВБР с треугольной формой спектра: красная линия – идеальная (требуемая), синяя линия – рассчитанная

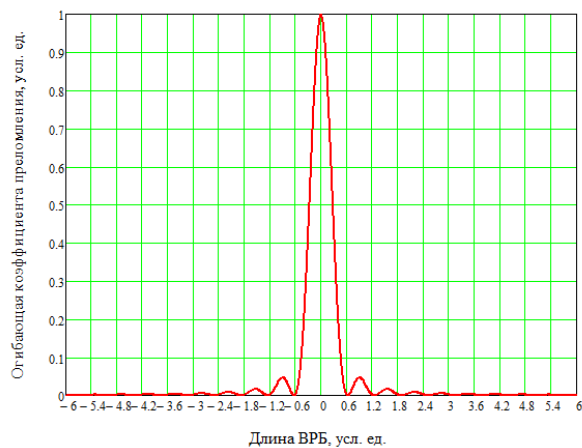


Рис. 2. Огибающая коэффициента преломления для ВБР с треугольной формой спектра



Рис. 3. Коэффициент амплитудной модуляции огибающей двухчастотного зондирующего излучения для В-ТРГ-ВБР при разносе частот: $\varepsilon = 2.0$

Волновые элементы КАВБС с прямоугольной формой спектра. Опираясь на метод, описанный выше, мы можем получить волновую ВБР с прямоугольной формой спектра (В-ПРГ-ВБР). Зададим внешний вид спектра В-ПРГ-ВБР симметричным соотношением:

$$\Phi(\lambda) = \begin{cases} A, & \lambda \in (-W, W) \\ 0, & \lambda \notin (-W, W) \end{cases} \quad (4)$$

На рис. 4 и рис. 5 приведены форма профиля решетки и огибающая коэффициента ее преломления. В-ПРГ-ВБР могут быть с успехом применены в качестве полосовых фильтров, либо датчиков с заданной пороговой зоной (уставкой). Говорить о коэффициенте модуляции огибающей двухчастотного зондирующего излучения для В-ПРГ-ВБР не имеет смысла, поскольку он будет постоянен во всех внутренних точках с двумя скачками на его границах. Вместе с тем ВБР с плоской формой контура может быть использована в качестве датчика показаний для физических величин. При воздействии на В-ПРГ-ВБР происходит сдвиг центральной длины волны вдоль оси абсцисс. Следовательно, сдвигу будут подвержены левая и правая границы спектра В-ПРГ-ВБР, что может быть с легкостью детектировано при помощи сканирования двухчастотными зондированием.

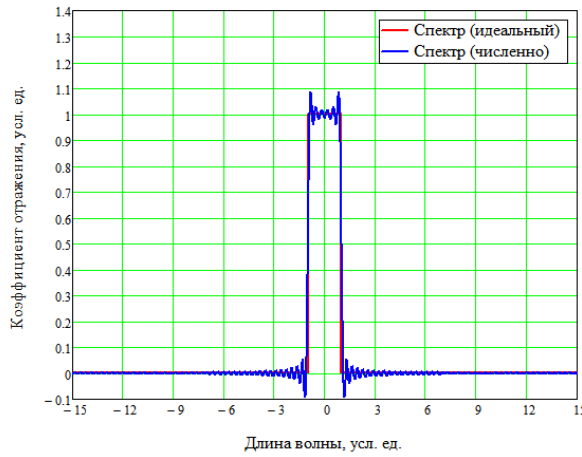


Рис. 4. Спектр ВБР с прямоугольной формой спектра: красная линия – идеальная (требуемая), синяя линия – рассчитанная

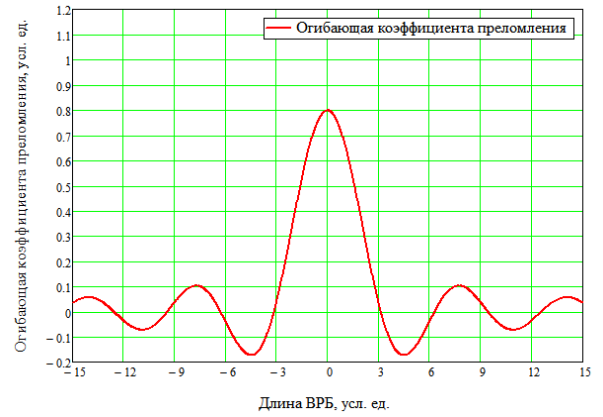


Рис. 5. Огибающая коэффициента преломления для ВБР с прямоугольной формой спектра

Резкое изменение коэффициента модуляции при двухчастотном зондировании будет информировать о том, что произошло попадание на границу спектра контура. Если при сканировании двухчастотным зондированием плавно менять несущую частоту зондирования, относительно которой происходит разнос двухчастотного зондирования, то можно определить и левую и правую границы ВБР с плоской формой спектра. Это в свою очередь дает информацию о смещении центральной длины волны В-ПРГ-ВБР, а, следовательно, и об изменении физической величины.

Волновые элементы КАВБС с трапециевидной формой спектра. Опираясь на метод, описанный выше, мы можем получить волновую ВБР с трапециевидной формой спектра (В-ТРП-ВБР). Зададим внешний вид спектра В-ТРП-ВБР асимметричным соотношением (4), в котором значение параметров для длин волн асимметричной трапеции определяются условными соотношениями $T_1 = 1,0$, $T_2 = 0,9$, $T_3 = 0,9$ и $T_4 = 2,0$. В общем виде, результат преобразования Фурье (4) будет комплексной функцией, в силу того, что спектр не является четной функцией.

$$\Phi(\lambda) = \begin{cases} \frac{A}{T_1}\lambda + \frac{A(T_1 + T_2)}{T_1} & \lambda \in [-T_1 - T_2, T_2] \\ A & \lambda \in (-T_2, 0] \\ A & \lambda \in (0, T_3] \\ \frac{A}{T_4}\lambda + \frac{A(T_3 + T_4)}{T_4} & \lambda \in (T_3, T_3 + T_4] \\ 0 & \lambda \notin (-T_1 - T_2, T_3 + T_4) \end{cases} . \quad (5)$$

Спектр для асимметричной В-ТРП-ВБР приведен на рис. 6.

Для несимметричного контура использовать косинус преобразование (3) невозможно. Необходимо пользоваться полным преобразованием Фурье:

$$F(z) = \sqrt{\frac{1}{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \Phi(\lambda) \cdot e^{-iz\lambda} d\lambda . \quad (6)$$

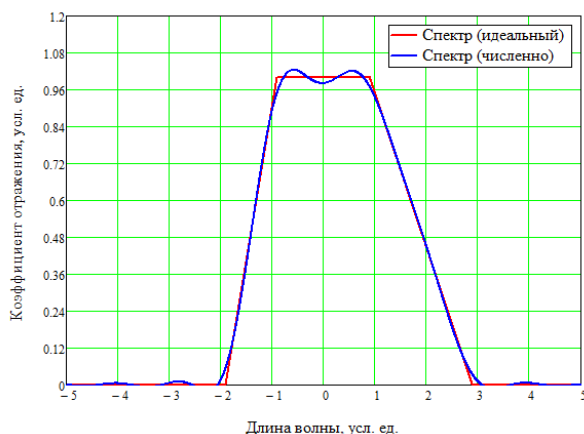


Рис. 6. Спектр ВБР в форме ассиметричной трапеции: красная линия – идеальная (требуемая), синяя линия – рассчитанная

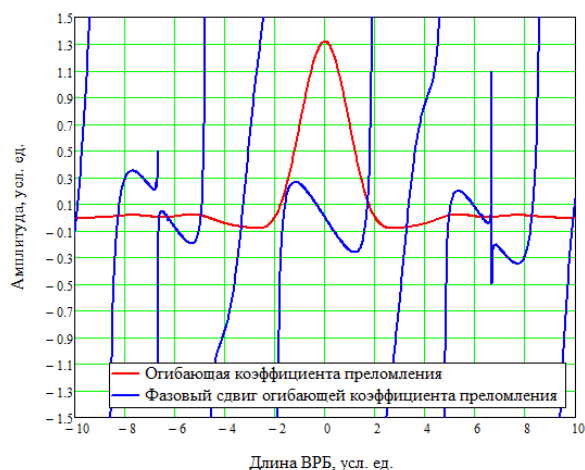


Рис. 7. Огибающая и фаза коэффициента преломления ВБР в форме ассиметричной трапеции: красная линия – огибающая коэффициента преломления; синяя линия – фаза коэффициента преломления

Фазовая часть $\text{Im}(F(z))$ спектральной характеристики равна отношению мнимой к вещественной части (6). Огибающая коэффициента преломления и фаза ВБР с ассиметричной трапециевидной формой спектра изображены на рис. 7, где хорошо видно, что в точках $L = -0,3$, $L = 0,0$ и $L = 0,3$ происходит изменение фазы, что необходимо учитывать при синтезе В-ТРИП-ВБР. Вещественная часть результата преобразования (6) $\text{Re}(F(z))$ определяет огибающую коэффициента преломления. Коэффициент амплитудной модуляции огибающей двухчастотного зондирующего излучения для В-ТРИП-ВБР приведен для двух разнесов частот на рис. 8.

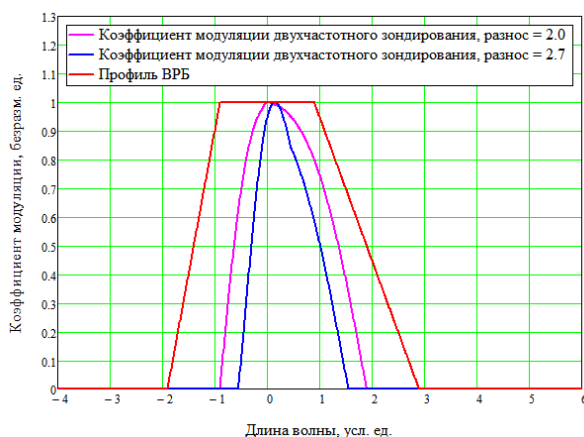


Рис. 8. Коэффициент амплитудной модуляции огибающей двухчастотного зондирующего излучения ВБР в форме ассиметричной трапеции для разнесов частот $\varepsilon = 2$ и $\varepsilon = 2.7$ (полная ширина В-ТРИП-ВБР на полувысоте)

2. Синтез фазовых элементов КАВБС с линейными склонами

Симметричные фазовые элементы КАВБС с треугольной формой спектра. Опираясь на метод, описанный выше, мы можем получить фазовую симметричную ВБР с треугольной формой спектра и фазовым π -сдвигом (Ф-С-ТРИП-ВБР). Зададим внешний вид

спектра Ф-С-ТРГ-ВБР симметричным соотношением (6), в котором значение параметров для длин волн симметричного треугольника ВБР и симметричного треугольного фазового π -сдвига определяются условными соотношениями $T_1 = T_4$ и $T_2 = T_3$ относительно центральной длины волны соответственно.

$$\Phi(\lambda) = \begin{cases} \frac{A}{T_1} \lambda + \frac{A(T_1 + T_2)}{T_1} & \lambda \in [-T_1 - T_2, T_2] \\ -\frac{A}{T_2} \lambda & \lambda \in (-T_2, 0] \\ \frac{A}{T_3} \lambda & \lambda \in (0, T_3] \\ \frac{A}{T_4} \lambda + \frac{A(T_3 + T_4)}{T_4} & \lambda \in (T_3, T_3 + T_4] \\ 0 & \lambda \notin (-T_1 - T_2, T_3 + T_4) \end{cases}, \quad (7)$$

где A – максимальная амплитуда, T_i – ширины треугольников у основания.

На рис. 9 и рис. 10 приведены форма профиля и огибающая коэффициента преломления для Ф-С-ТРГ-ВБР.

На рис. 11 приведены коэффициенты амплитудной модуляции огибающей двухчастотного зондирующего излучения при сканировании треугольной ВБР с фазовым π -сдвигом. Зондирование левой и правой частей решетки ведется с разном частот, равным ширине левого (правого) треугольника на половине его высоты. Зондирование центральной части ведется с разном частот, равным ширине центрального треугольника на половине высоты.

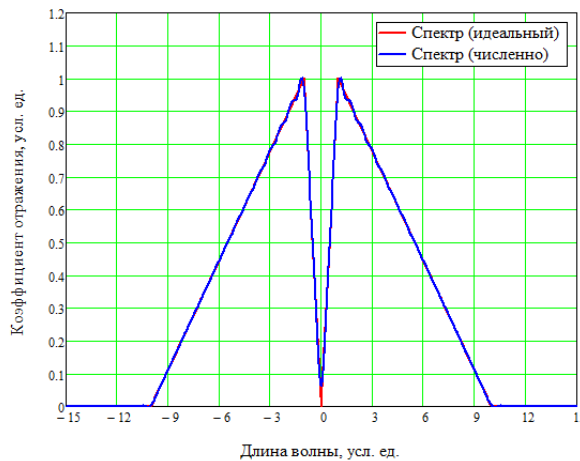


Рис. 8. Спектр симметричной треугольной ВБР с фазовым π -сдвигом:
красная линия – идеальная (требуемая),
синяя линия – рассчитанная

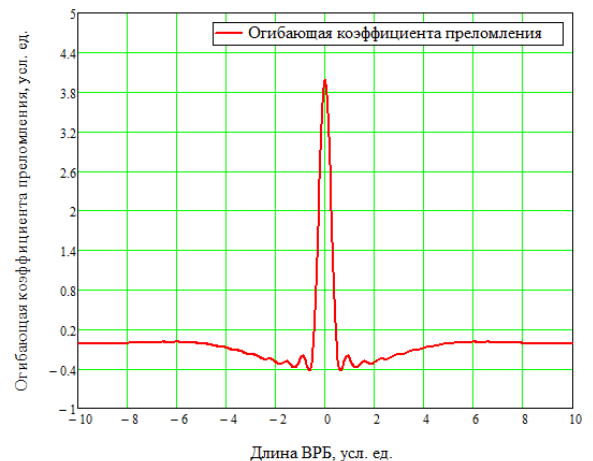


Рис. 9. Огибающая коэффициента преломления симметричной треугольной ВБР с фазовым π -сдвигом

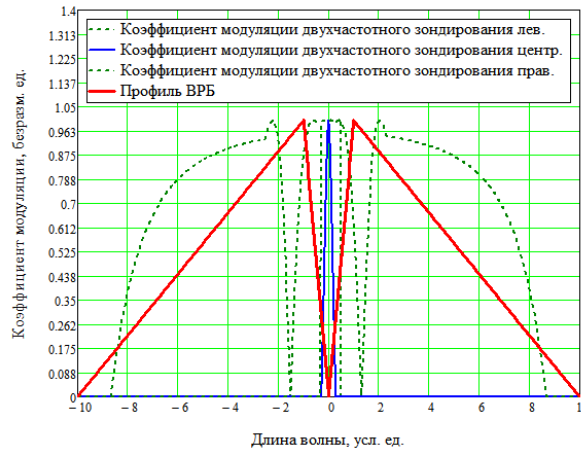


Рис. 10. Коэффициент амплитудной модуляции огибающей двухчастотного зондирующего излучения симметричной треугольной ВБР с фазовым π -сдвигом при разное $\varepsilon = 2$

Как и в предыдущих формах профилей спектра ВБР, которые имели вертикальную ось симметрии, можно применять не полное, а только косинус преобразование Фурье, которое допустимо для четных функций. Это позволяет не только ускорить и упростить расчет спектральной характеристики, но и исключить необходимость вычисления фазы, поскольку для преобразований Фурье всех четных функций фаза тождественно равна нулю.

Асимметричные фазовые элементы КАВБС с треугольной формой спектра. Далее рассмотрим случай асимметричной формы ВБР с треугольной формой профиля Ф-АС-ТРГ-ВБР. Зададим форму спектра Ф-АС-ТРГ-ВБР, сконфигурированной в виде двух треугольников, так же, как это было определено соотношениями (7). Только в этом случае не будем накладывать условий симметричности контура ВБР относительно центральной длины волны.

Детализируя это положение, зададим общий вид спектра Ф-АС-ТРГ-ВБР соотношением (7) со значением параметров $T_1 = 3,0$, $T_2 = 0,3$, $T_3 = 0,3$ и $T_4 = 2,0$. Обратим внимание, что в случае асимметричного профиля Ф-АС-ТРГ-ВБР $T_1 \neq T_4$.

$$\Phi(\lambda) = \begin{cases} \frac{A}{T_1} \lambda + \frac{A(T_1 + T_2)}{T_1} & \lambda \in [-T_1 - T_2, T_2] \\ -\frac{A}{T_2} \lambda & \lambda \in (-T_2, 0] \\ \frac{A}{T_3} \lambda & \lambda \in (0, T_3] \\ \frac{A}{T_4} \lambda + \frac{A(T_3 + T_4)}{T_4} & \lambda \in (T_3, T_3 + T_4] \\ 0 & \lambda \notin (-T_1 - T_2, T_3 + T_4) \end{cases} \quad (8)$$

В общем виде, результат преобразования Фурье (8) будет комплексной функцией, в силу того, что спектральная форма ВБР не является четной функцией. Для построения формы несимметричного контура необходимо использовать не только амплитудную часть спектральной характеристики, но и фазовую часть спектральной характеристики.

Огибающая коэффициента преломления для спектра Ф-АС-ТРГ-ВБР приведена на рис. 11.

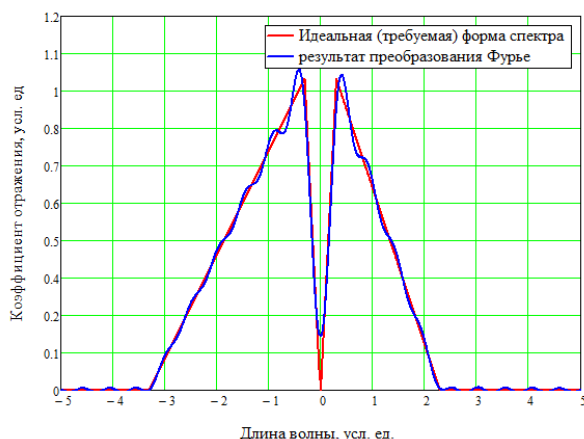


Рис. 11. Спектр асимметричной треугольной ВБР с фазовым π -сдвигом: красная линия — идеальная (требуемая), синяя линия — рассчитанная (вещественная часть преобразования)

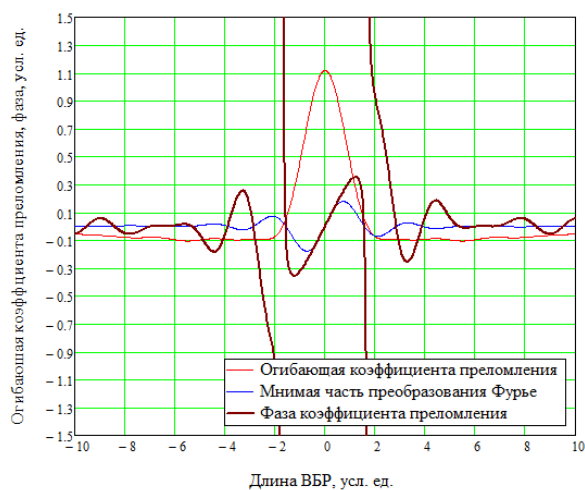


Рис. 12. Огибающая и фаза коэффициента преломления асимметричной треугольной ВБР с фазовым π -сдвигом: красная линия — огибающая; коричневая линия — фаза

Как и для ассиметричной трапеции, фазовая часть $\text{Im}(F(z))$ спектральной характеристики равна отношению мнимой к вещественной части (6). Огибающая коэффициента преломления и фаза Ф-АС-ТРГ-ВБР изображены на рис. 12, где хорошо видно, что при тех же параметрах фазового сдвига в точках $L = -0,3$, $L = 0,0$ и $L = 0,3$ происходит изменение фазы, что необходимо учитывать при синтезе Ф-АС-ТРГ-ВБР. Вещественная часть результата преобразования (6) $\text{Re}(F(z))$ определяет огибающую коэффициента преломления.

Коэффициент амплитудной модуляции огибающей двухчастотного зондирующего излучения для Ф-АС-ТРГ-ВБР приведен на рис. 13.

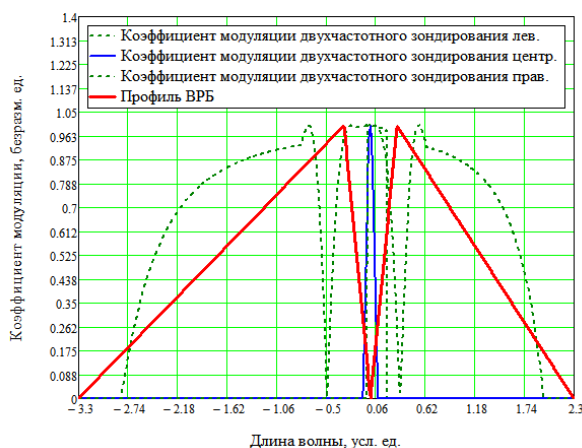


Рис. 13. Коэффициент амплитудной модуляции огибающей двухчастотного зондирующего излучения асимметричной треугольной ВБР с фазовым π -сдвигом для разноса частот $\varepsilon = 2$

Как и в предыдущем случае, зондирование левой/правой частей асимметричного двухтреугольного профиля ведется с разносом частот, равным ширине левого/правого треугольника на половине его высоты. Зондирование центральной части ведется с разносом частот, равным ширине треугольника на половине высоты.

3. Пример реализации геометрически линейных В-ТРГ-ВБР и Ф-ТРГ-ВБР

На рис. 14 показана АЧХ В-ТРГ-ВБР. В виду отсутствия специальной фазовой маски для изготовления решеток со специальной формой спектра, процесс записи состоял в последовательной записи трех брэгговских решеток, каждая из которых смещена относительно другой на $\approx 0,7$ нм и имеет более низкий коэффициент отражения.



Рис. 14. АЧХ В-ТРГ-ВБР с квазитреугольным спектром

На рис. 14 видно, что профиль В-ТРГ-ВБР имеет достаточно линейные фронты, но не обеспечивает требуемую форму профиля в области максимального коэффициента отражения, а также требуемую крутизну левого фронта профиля спектра решетки. Это объясняется использованием оборудования, не предназначенного для решения поставленных задач. Но данный эксперимент показывает возможность записи на данном оборудовании брэгговских решеток с ассиметричным спектром, что позволяет сделать вывод об улучшении характеристик при изменении настроек записи ВБР для приближения результатов к требуемым.

Для формирования требуемого профиля спектра симметричной и ассиметричной треугольной ВБР требуется использование фемтосекундного лазера и пошагового метода записи с определенным законом изменения показателя преломления, коэффициента аподизации и коэффициента chirпирования на каждом участке ВБР, например, существующего в лаборатории ИЭА СО РАН.

На рис. 15 показана АЧХ решетки специального типа с широким окном прозрачности.

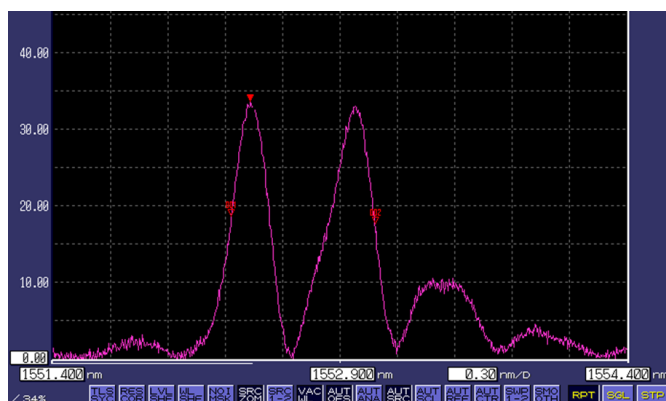


Рис. 15. АЧХ Ф-ТРГ-ВБР с квазитреугольным спектром

АЧХ решетки, зарегистрированная на анализаторе спектра FTV 5240-S с разрешением 2 пм, показал наличие в нем окна прозрачности шириной 100 пм (~ 12 ГГц), расположенным на центральной длине волны 1552,6 нм и разделяет ВРБ на две с полной шириной 200 пм (~ 24 ГГц). Полученный тип решетки позволил реализовать интеррогатор с двумя диапазонами измерений. Преобразование «частота-амплитуда» проводилось в окне прозрачности для частот диапазона от 0,3 до 12 ГГц и в полосе отражения для частот от 12-24 ГГц. Оценка полосы частот проводилась с учетом боковых лепестков решетки и их амплитуд, которые ограничивают возможный диапазон измерений по амплитуде.

Вариации размеров неоднородностей, вносимых при записи, позволили получить широкий ряд решеток с различным размером окна прозрачности и практически треугольной АЧХ. При экспериментальном макетировании нами использовалась решетка 0,3-10 ГГц, поскольку в распоряжении находился фазовый электрооптический модулятор JDSU APE Phase с пороговой частотой 14 ГГц и рабочей частотой до 10 ГГц, предоставленный ООО «Инверсия-Сенсор» (г. Новосибирск).

Заключение

1. Рассмотрены вопросы синтеза ВБР с геометрически линейной формой спектра на основе метода обратного преобразования Фурье: треугольной, прямоугольной, трапециевидной, в том числе с встроенными в них фазовыми π -сдвигами. Данные решетки могут быть использованы как элементы КАВБС, как отдельные ВБР датчики систем, построенных на принципах «фотонной кожи», с линеаризованными характеристиками и возможностью реализации диапазонных установок, как интеррогаторы для КАВБС и ВБР, как мультиплексоры и как специальные полосовые фильтры. Изготовленные ВБР в соответствии с полученными законами модуляции показателя преломления волокна показали неплохое соответствие расчетных и полученных спектральных характеристик. При этом показано, что при записи ВБР с асимметричными профилями и окнами прозрачности требуется искусственное внесение в закон модуляции их показателя преломления фазового π -сдвига.

2. Отражены особенности зондирования спектральных геометрически линейных характеристик ВБР двухчастотным способом. Как только при зондировании коэффициент модуляции огибающей становится максимальным, равным 1, это означает, что зондирование ведется либо на центральной длине волны, либо на плоской вершине ВБР. Если коэффициент модуляции двухчастотного зондирования был равным 1 и стал уменьшаться – зондирование ведется на правом склоне ВБР, если возрастал и стал равным 1 – зондирование велось на левом склоне ВБР. Максимум коэффициента модуляции огибающей определяет положение центральной длины волны ВБР. Величина чувствительности и разрешающей способности измерений зависит от разности частот зондирующего излучения.

3. Показано, что технология применения геометрически линейной формы профиля в качестве чувствительных элементов КАВБС совместно с методом определения центральной длины волны по методу Ильина-Морозова, является удобным инструментом в создании интеррогаторов для «фотонной кожи».

4. Предложенное решение применения радиофотонных интеррогаторов и результаты моделирования, например, на основе В-ТРГ-ВБР и В-ПРГ-ВБР, создают основу для создания персонального дозиметра усталостных микротравм для бодибилдеров и штангистов. Эта реализация может быть заменена на реализацию на базе единой В-ТРП-ВБР. Данная реализация на одной ВБР позволяет сигнализировать о том, что мышца получила достаточный объем микроразрывов для запуска гипертрофии, и дальнейшее увеличение нагрузки не имеет смысла и ведет к перетренированности.

Работа выполнена в рамках государственного задания FZSU-2026-0009, рег. номер НИОКТР 126020516512-7.

Список литературы

1. Денисенко, П.Е. Волоконные решетки Брэгга с фазированной структурой в распределенных информационно-измерительных системах / С.Г. Алюшина, О.Г. Морозов, П.Е. Денисенко и др. // Нелинейный мир. – 2011. – Т. 9. – № 8. – С. 522-528.
2. Ibsen, M. Sinc-sampled fiber Bragg gratings for identical multiple wavelength operation / M. Ibsen, M. K. Durkin, M. J. Cole, R. I. Laming // IEEE Photon. Technol. Lett. – 1998. – V. 10(6). – P. 842–844.
3. Baskar, S. Design of triangular FBG filter for sensor applications us-ing covariance matrix adapted evolution algorithm / S. Baskar, P. N. Suganthan, N. Q. Ngo, A. Alphones, R. T. Zheng // Opt. Commun. – 2006. – V. 260. – P. 716–722.
4. Roman, J. Design of corrugated waveguide filters by fourier-transform techniques / J. Roman, K. Winick // IEEE J. Quantum Electron. – 1990. – V. 26(11). – P. 1918–1929.
5. H. Yi, S.-H. Lee, H. Ko, D. Lee, W.-G. Bae, T.-L. Kim, D.S. Hwang, H.E. Jeong, Ultra adaptable and wearable photonic skin based on a shape-memory, responsive cellulose derivative, Adv. Funct. Mater. 29 (2019) 1902720, <https://doi.org/10.1002/adfm.201902720>.
6. Sun Y. Biomimetic chromotropic photonic-ionic skin with robust resilience, adhesion, and stability / Y. Sun, Y. Wang, Y. Liu et al. // Advanced Functional Materials. – 2022. – T. 32 (33). – P.2204467, DOI: <https://doi.org/10.1002/adfm.202204467>.
7. Li M. Bioinspired colloidal photonic composites: fabrications and emerging applications / M. Li, Q. Lyu, B. Peng, X. Chen, L. Zhang, J. Zhu // Advanced Materials. – 2022. - 34 (52).– P.2110488, DOI: <https://doi.org/10.1002/adma.202110488>.
8. Alhussein A.N.D. Fiber Bragg Grating Sensors: Design, Applications, and Comparison with Other Sensing Technologies / A.N.D. Alhussein, M.R.T.M. Qaid, T. Agliullin et al. // Sensors. - 2025. T. 25(7). – P.2289. DOI: <https://doi.org/10.3390/s25072289>.
9. Morozov O. Multi-Addressed Fiber Bragg Structures for Microwave-Photonic Sensor Systems/ O. Morozov, A. Sakhabutdinov, A. Kuznetsov et al.// Sensors. – 2020. – Т. 20(9). – P.2693.– DOI: <https://doi.org/10.3390/s20092693>.
10. Agliullin T. Overview of Addressed Fiber Bragg Structures’ Development / T. Agliullin, G. Il’In, R. Misbakhov et al.// Photonics. – 2023. – Т.10 (2). – P.175. DOI: <https://doi.org/10.3390/photonics10020175>.
11. Морозов О.Г. Адресные волоконные брэгговские структуры в квазираспределенных радиофотонных сенсорных системах / О.Г. Морозов, А.Ж. Сахабутдинов // Компьютерная оптика. - 2019. - Т. 43. - № 4. - С. 535-543. DOI: <https://doi.org/10.18287/2412-6179-2019-43-4-535-543>.
12. Agliullin T. Addressed Fiber Bragg Structures in Load-Sensing Whell Hub Bearings /T. Agliullin, R. Gubaidullin, A. Sakhabutdinov et al. // Sensors. – 2020. – Т. 20. – № 21. – С. 1-14. DOI: <https://doi.org/10.3390/s20216191>
13. Мисбахов Р.Ш. Комбинированные двухкомпонентные многоадресные волоконные брэгговские структуры / Р.Ш. Мисбахов, В.И. Артемьев, О.Г. Морозов и др. // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2024. – № 2 (62). – С. 57-73.
14. Аглиуллин Т.А. Управление тонкой структурой трехкомпонентных адресных брэгговских измерительных преобразователей, последовательно записанных в оптическое волокно квазираспределенной радиофотонной сенсорной / Т.А. Аглиуллин, Р.Р. Губайдуллин, А.А. Кузнецов и др.//Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2020. – № 4 (48). –С. 72-81.
15. Морозов О.Г. Двухчастотный метод определения параметров резонансных датчиков СВЧ-диапазона / О.Г. Морозов, А.Р. Насыбуллин, Д.А. Веденькин, А.А. Севастьянов //

- Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2014. – № 1 (20). – С. 76-86.
16. Касимова Д.И. Оценка возможностей применения волоконных решеток Брэгга с гауссовым профилем отражения в качестве датчика температуры / Д.И. Касимова, А.А. Кузнецов, П.П. Крыницкий // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2013. – № 2 (18). – С. 73-81.
 17. Талипов А.А. Метод формирования двухчастотного излучения для синтеза солитонов и применения спектрально-эффективной модуляции RZ и CSRZ форматов в оптических сетях доступа / А.А. Талипов, О.Г. Морозов, Г.И. Ильин и др. // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2012. – № 2 (16). – С. 3-12.
 18. Айбатов Д.Л. Преобразование спектра оптического излучения в двухканальном модуляторе Маха-Цендера и ROF-фильтр на его основе / Д.Л. Айбатов, О.Г. Морозов, Т.С. Садеев // Нелинейный мир. – 2010. – Т. 8. – № 5. – С. 302-309.
 19. Sadeev T.S. Investigation and analysis of Electro-optical Devices in Implementation of Micro-wave Photonic Filters / T.S. Sadeev, O.G. Morozov et al. // Proceedings of SPIE. – 2012. – V. 8410. – P. 841007. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.923121>
 20. Куприянов В.Г. Волоконно-оптические технологии в распределенных системах экологического мониторинга / В.Г. Куприянов, О.А. Степущенко, В.В. Куревин и др. // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2011. – Т. 13. – № 4-4. – С. 1087-1091.
 21. Natanson O.G. Development Problems of Frequency Reflectometry for Monitoring systems of Optical Fiber Structures / O.G. Natanson, O.G. Morozov, R.A. Akhtiamov, V.F. Gusev // Proceedings of SPIE. – 2005. – V. 5854, P. 215-223. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.634644>
 22. Морозов О.Г. Определение характеристик спектра усиления Мандельштама–Бриллюэна с помощью двухчастотного зондирующего излучения / О.Г. Морозов, Г.А. Морозов, А.А. Талипов, В.Г. Куприянов // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2012. – Т. 15. – № 3. – С. 95-100.
 23. Morozov O.G. Optical Vector Network Analyzer Based on Amplitude-Phase Modulation / O.G. Morozov, G.A. Morozov, I.I. Nureev, D.I. Kasimova // Proc. of SPIE. – 2016. – V. 9807. – P. 980717. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2232993>

SYNTHESIS OF REFRACTIVE INDEX PROFILE FOR WAVE AND PHASE ELEMENTS OF COMBINED ADDRESSABLE FIBER BRAGG STRUCTURES WITH A GEOMETRICALLY LINEAR SPECTRUM AS "PHOTONIC SKIN" SENSORS

*I.I. Nureyev, A.Zh. Sakhabutdinov, R.A. Yusupov,
Rus. Sh. Misbakhov, Sh.R. Yusupov, L.N. Ibragimova, R.M. Muratov*

Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev-KAI
10, st. Karl Marx, Kazan, 420111, Russian Federation

Annotation. Combined addressable fiber Bragg structures (CAFBS) are a type of AFBS whose spectral characteristics primarily consist of two narrowband reflective (wave) or transmissive (phase) components of fiber Bragg gratings (FBGs), or a combination of both, separated by a specific frequency in the

radio range, which is called the addressable frequency and remains unchanged under any external influences. Typically, in industrial monitoring sensor systems, components with Gaussian reflective and Lorentzian transmissive spectral profiles are considered and applied. The use of CAFBS as part of "photonic skin" (sensitive optical coatings for robotics, prosthetics, or medical and sports monitoring) is associated with the creation of high-precision sensor networks for measuring deformations, pressure, and temperature. To solve these problems, wave and phase components of CAFBS with a geometrically linear spectrum profile are required. These components are triangular, rectangular, and trapezoidal FBGs, with a π -phase shift that also has a geometrically linear spectrum profile. This paper examines the synthesis of the refractive index profile of wave and phase elements of CAFBS—FBGs—with a geometrically linear spectrum as "photonic skin" sensors.

Keywords: sports engineering, "photonic skin", combined addressable fiber Bragg structure, wave reflective fiber Bragg grating, phase transmitting fiber Bragg grating with a phase π -shift, inverse Fourier transform, synthesis of the refractive index profile of FBG with a geometrically linear spectrum, triangular, rectangular, trapezoidal spectrum

Статья представлена в редакцию 21 сентября 2026 г.