

МАЛОСЕНСОРНЫЕ РАДИОФОТОННЫЕ АДРЕСНЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ МАНОМЕТРИИ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ

В.В. Пуртов¹, А.Н.Д. Альхуссейн²

¹ ООО «Инфоком-СПБ», Российская Федерация,
Российская Федерация, 194156, г. Санкт-Петербург,
пр. Энгельса, д. 27, лит. БУ, корпус 40

² Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева – КАИ
Российская Федерация, 420111, г. Казань, К. Маркса, 10

Аннотация. В работе представлены результаты исследования оптомеханики узкополосных классических волоконных брэгговских решеток (ВБР) с малым коэффициентом связи мод и записанной в них различными методами спектрально-адресной информации путем введения в их структуру двух симметричных фазовых π -сдвигов. Проведен анализ прохождения широкополосного лазерного излучения через спектрально-адресные ВБР (адресные-ВБР, А-ВБР) в малосенсорных приложениях. Приведено теоретическое обоснование способов измерения давления и температуры, в том числе для компенсации влияния температуры в манометрии. Предложена методика радиофотонного измерительного преобразования и определение его основных методических погрешностей. Дана постановка задачи контроля давления в верхнем и нижнем сфинктерах пищевода (по три датчика на каждый сфинктер с расстоянием между датчиками в 0,5–1 см). В качестве чувствительных элементов предложено использование массива А-ВБР с малым коэффициентом связи мод и спектрально-адресной информацией, определенной наличием двух симметричных дискретных фазовых π -сдвигов. Обосновывается теоретическая и математическая основа метода измерительного преобразования. В дополнение к математической модели предложена методика обеспечения равномерности шкалы измерений во всем диапазоне смещения центральных длины волн датчиков и методика компенсации флуктуаций мощности оптического излучения во всей системе в целом. Оптико-электронная схема измерительной системы, включает в себя шесть датчиков, сгруппированных в две группы по месту их размещения и в три группы по топологии их подключения. Обоснована корректность предложенной схемы и ее соответствие постановке задачи и методу измерительного преобразования, включая требование к однозначности определения амплитуд на адресных частотах датчиков.

Ключевые слова: математическое моделирование, адресная волоконная брэгговская решетка, манометрия высокого разрешения, радиофотоника.

Постановка задачи

Рассмотрим задачу непрерывного контроля давления в верхнем и нижнем сфинктерах пищевода. Конструкция катетера предусматривает установку двух групп датчиков (по три датчика на каждую группу) в верхней и нижней частях катетера для контроля верхнего и нижнего сфинктеров пищевода, рисунок 1а), б).

Датчики в каждой группе расположены на расстоянии 0,5–1 см между собой, что позволяет проводить измерения в области обоих сфинктеров одновременно с учетом анатомических особенностей каждого пациента. В область действия каждого из сфинктеров попадает по одному датчику давления, что обеспечивает возможность одновременного съема информации с обоих сфинктеров одновременно, получая информацию с одного верхнего и одного нижнего датчиков.

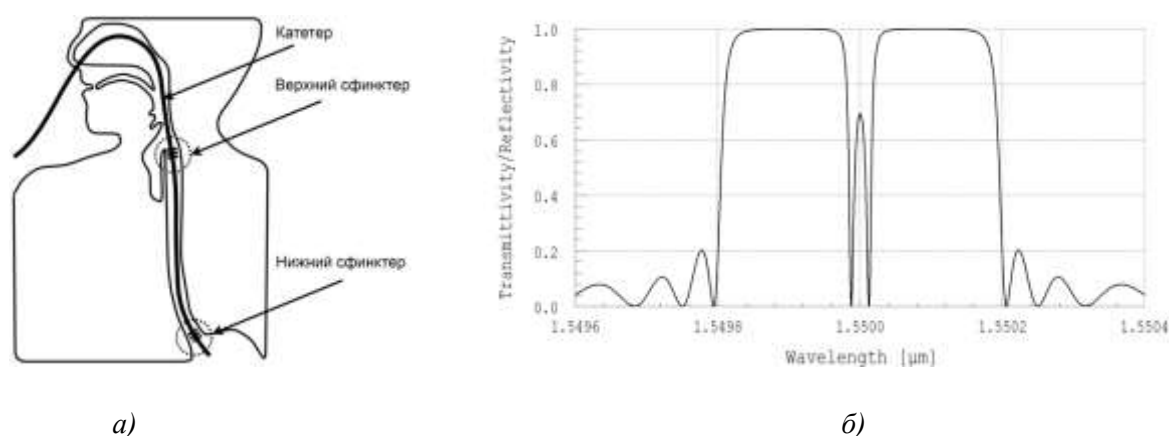


Рис. 1. Схема установки малосенсорного катетера (а) и спектральная характеристика используемых в катетере А-ВБР (б)

На рисунке 1 а), б) показан чувствительный элемент датчика – А-ВБР с малым коэффициентом связи мод и спектрально-адресной информацией, определенной двумя симметричными π -сдвигами, записанными в ней.

Таким образом, измерительная система представляет собой зонд (катетер), вводимый перорально, который содержит шесть датчиков давления, объединенных в две группы. В рабочем режиме показания снимаются с двух датчиков по одному из каждой группы, показания других датчиков могут быть использованы в качестве датчиков температуры. Фактически, имеется мало (шесть) сенсорная измерительная система. Диапазон измерения давления от 0 до 13,3 кПа, частота регистрации сигнала не менее 8 Гц с разрешающей способностью 2–10 Па.

В работе решается задача максимального упрощения и удешевления системы опроса, как одиночного оптоволоконного датчика на основе ВБР, так и массива таких датчиков. Задача исследовательской работы заключается в возможности объединить радиофотонные методы опроса с волоконными решетками Брэгга, настроенными на одну центральную длину волны. Прежде чем перейти к моделированию всей измерительной системы, приведем метод измерительного преобразования, используемый для определения центральной длины волны одиночной и двояной А-ВБР.

Метод измерительного преобразования

Основная идея заключается в том, чтобы перенести формирование двухчастотного радиофотонного сигнала с лазерного источника на ВБР структуру и, сделав ее разностную частоту уникальной характеристикой, сохранить за ней возможность оставаться чувствительным элементом измерительной системы [1–3]. Определим требования к спектральной форме адресной волоконной брэгговской структуре и оптико-электронной схеме опроса.

Разность частот между спектральными компонентами ВБР с двумя дискретными фазовыми π -сдвигами является инвариантной особенностью, что позволяет определить ее как адрес такой ВБР, а саму ВБР структуру с внесенной в нее адресной частотой, определить, как спектрально-адресную А-ВБР. Рассмотрим спектр прохождения лазерного излучения через А-ВБР структуру, которая сформирована волоконной брэгговской решеткой с двумя дискретными фазовыми π -сдвигами. Спектр А-ВБР выберем согласно приведенным в [4] рекомендациям.

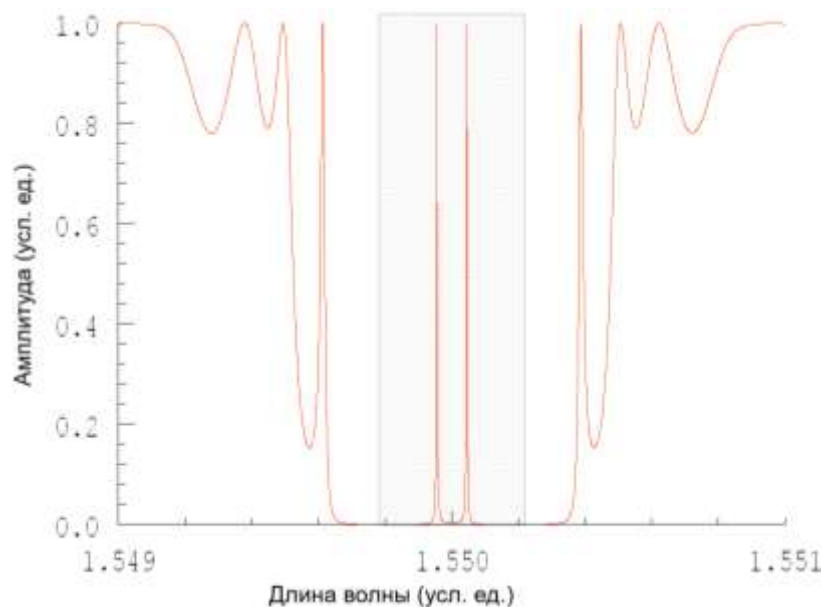


Рис.2. Спектр прохождения для А-ВБР с двумя дискретными фазовыми π -сдвигами. Заштрихованной областью на спектре обозначена часть излучения, поступающая на фотоприемник

Область спектра А-ВБР выберем таким образом, чтобы в область фотоприемника попадал свет только от двух центральных спектральных компонент при любом смещении центральной длины волны А-ВБР (заштриховано на рисунке 2).

Абсолютные значения частот, формируемых А-ВБР, много больше разностной частоты между ними, следовательно, на фотоприемнике будут возникать биения мощности сигнала, прошедшего через А-ВБР структуру, с частотой, равной разностной частоте между оптическими несущими. Глубина и амплитуда модуляции этих биений несут в себе информацию о центральной длине волны А-ВБР структуры.

Для того, чтобы разностную частоту А-ВБР можно было бы использовать в качестве уникальной характерной особенности, необходимо потребовать, чтобы в измерительной системе адрес не менялся при сдвиге центральной длины волны и в системе не было бы А-ВБР структур с совпадающими адресами. Оптико-электронная схема опроса А-ВБР приведена на рисунке 3.

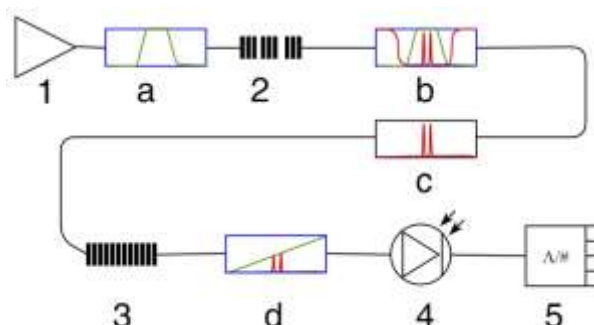


Рис.3. Оптико-электронная схема опроса одиночной А-ВБР на прохождение сигнала: 1 – широкополосный лазерный источник; 2 – А-ВБР; 3 – фильтр с наклонной АЧХ; 4 – фотоприемник; 5 – АЦП

Широкополосный лазерный источник – 1 формирует широкополосное непрерывное лазерное излучение, которое проходит через А-ВБР – 2 с формированием двухчастотного непрерывного лазерного излучения (с), которое, проходя через фильтр с наклонной

АЧХ – 3, образует двухчастотное лазерное излучение (d) с модифицированными амплитудами. Полученное излучение принимается на фотоприемнике – 4, оцифровывается на АЦП – 5, и обрабатывается в блоке обработки цифрового сигнала, который на схеме не показан.

Спектральные формы окон прозрачности в А-ВБР описываются лоренцевским контуром.

$$\aleph(\omega) = \frac{\aleph_0}{1 + \left(\frac{\omega - \omega_0}{\gamma} \right)^2}, \quad (1)$$

где $\aleph_0$ – амплитудный коэффициент, γ – добротность, ω_0 – центральная длина волны контура. Излучение, формируемое одним из таких окон прозрачности с лоренцевым контуром, можно записать как предельную сумму – интеграл – излучений на частотах, входящих в этот контур:

$$A(t) = A_0 \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\cos(\omega t + \varphi)}{1 + \left(\frac{\omega - \omega_0}{\gamma} \right)^2} d\omega, \quad (2)$$

где ω_0 – центральная частота гармоники, φ – ее начальная фаза, A_0 – амплитуда.

Сумма колебаний двух излучений описывает математическую модель светового отклика, центральной части А-ВБР, которая пропорциональна:

$$F(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \left[\frac{A \cos(\omega t + \varphi_A)}{1 + \left(\frac{\omega - (\omega_0 - \Omega / 2)}{\gamma} \right)^2} + \frac{B \cos(\omega t + \varphi_B)}{1 + \left(\frac{\omega - (\omega_0 + \Omega / 2)}{\gamma} \right)^2} \right] d\omega. \quad (3)$$

В (3) использованы обозначения ω_0 – центральная длина волны А-ВБР, Ω – разностная (адресная) частота, φ_A и φ_B – начальные фазы, A и B – амплитуды левой и правой частотных компонент, γ – добротность контуров. При засветке А-ВБР широкополосным когерентным лазерным излучением можно считать, что $\varphi_A \cong \varphi_B$ с высокой степенью точности, обозначим их за φ и перепишем (3) в виде:

$$F(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \left[\frac{A}{1 + \left(\frac{\omega - \omega_0 + \Omega / 2}{\gamma} \right)^2} + \frac{B}{1 + \left(\frac{\omega - \omega_0 - \Omega / 2}{\gamma} \right)^2} \right] \cos(\omega t + \varphi) d\omega. \quad (4)$$

С уменьшением γ резонансный контур, описываемый лоренцевской кривой, становится уже, рисунок .4.

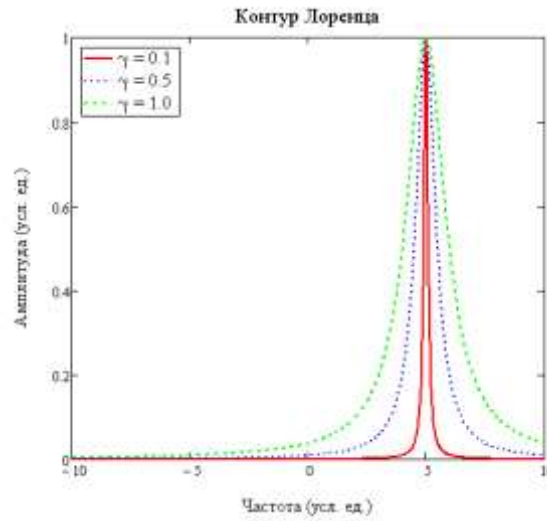


Рис.4. Зависимость лоренцевского контура от его добротности

В предельном случае, для сверхузких резонансных контуров, лоренцевский контур можно описать дельта-функцией:

$$\lim_{\gamma \rightarrow 0} A(t) = \lim_{\gamma \rightarrow 0} \left(A_0 \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\cos(\omega t + \varphi)}{1 + \left(\frac{\omega - \omega_0}{\gamma} \right)^2} d\omega \right) = A_0 \delta(\omega_0) \sin(\omega_0 t + \varphi) . \quad (5)$$

Суммарный двухчастотный отклик, следовательно, может быть записан как сумма колебаний на несущих частотах:

$$F(t) = A e^{j\left(\left(\omega_0 - \frac{\Omega}{2}\right)t + \varphi\right)} + B e^{j\left(\left(\omega_0 + \frac{\Omega}{2}\right)t + \varphi\right)} . \quad (6)$$

Исследуем ток на фотоприемнике, который возникает при приеме излучения, возникающего при прохождении широкополосного лазерного излучения через А-ВБР. Несущие частоты узкополосных оптических излучений лежат в оптической частотной области, а разностная адресная частота А-ВБР расположена в радиочастотной области электромагнитного спектра излучения. Широкополосное непрерывное излучение, направленное на адресную А-ВБР структуру, формирует двухчастотное лазерное излучение, математическая запись отклика которого представляется в виде алгебраической суммы двух колебаний на характерных оптических частотах в виде (7):

$$R(t) = A \cdot e^{j(\omega \cdot t + \varphi_A)} + B \cdot e^{j((\omega + \Omega) \cdot t + \varphi_B)} , \quad (7)$$

где A – амплитуда колебаний на частоте ω , B – амплитуда колебаний на частоте $\omega + \Omega$, Ω – разность частот между правой и левой составляющей двух частотного отклика А-ВБР, определяемая как адресная частота А-ВБР. Выражение (7) переписано в терминах частот, описывающих положение левой и правой частот А-АБР, где ω – определяет положение левой частотной компоненты, а $\omega + \Omega$ – правой частотной компоненты.

В условиях математической модели потребуем равенство амплитуд $A = B$ на частотах ω и $\omega + \Omega$ для А-ВБР структуры при направлении на нее равномерного спектрального излучения с прямоугольной спектральной формой.

Фотодетектор, входящий в состав фотоприёмника, является нелинейным квадратичным элементом, выходной ток которого пропорционален квадрату амплитуды падающего на него оптического поля, следовательно, суммарный отклик имеет вид (8):

$$F(t) = |R(t)|^2, \quad (8)$$

где $R(t)$ – световой поток, описываемый (7).

Предел чувствительности фотоприемника находится в радиочастотном диапазоне, в то время как несущие частоты лежат в оптическом частотном диапазоне. Исключив из (8) все высокие частоты, получим колебаний интенсивности светового потока:

$$P(t) = A(\omega)^2 + B(\omega)^2 + 2A(\omega)B(\omega) \cdot \cos(\Omega \cdot t + \varphi_B - \varphi_A). \quad (9)$$

Если при смещении центральной частоты А-ВБР не происходит изменение амплитуд $A(\omega)$ и $B(\omega)$ ее частотных компонент (что в общем случае справедливо для А-ВБР), то как можно заметить из (9), изменение центральной частоты ($\omega_B = \omega + \Omega/2$) для А-ВБР не влечет за собой изменение колебаний интенсивности выходного тока фотоприемника. Для того, чтобы обеспечить возможность определения смещения центральной частоты А-ВБР, необходимо обеспечить монотонное изменение амплитуд $A(\omega)$ и $B(\omega)$ в зависимости от смещении ее центральной частоты. Для чего установим перед фотоприемником частотный фильтр с наклонной амплитудно-частотной характеристикой, обеспечив тем самым изменение амплитуд $A(\omega)$ и $B(\omega)$ при смещении центральной частоты А-ВБР. На рисунке 5 приведена схема взаимодействия а-ВБР и фильтра с наклонной АЧХ.

Фильтр с наклонной АЧХ опишем линейной зависимостью вида:

$$L(\omega) = u \cdot \omega + v. \quad (10)$$

Тогда, изменение амплитуд $A(\omega)$ и $B(\omega)$ при прохождении оптического излучения от А-ВБР после фильтра с наклонной АЧХ запишется как:

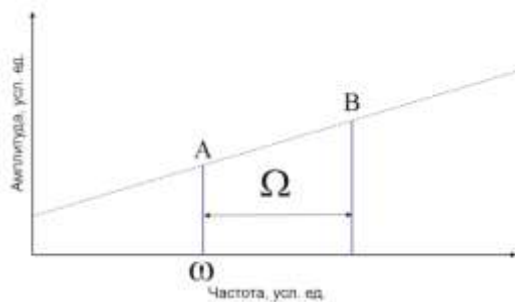


Рис. 5. Схема пояснение к взаимодействию А-ВБР с наложенным на нее частотным фильтром с наклонной АЧХ: сплошная линия – оптические составляющие А-ВБР, штриховая линия – фильтр с наклонной АЧХ

$$A(\omega) = L(\omega) = u \cdot \omega + v \text{ и } B(\omega) = L(\omega + \Omega) = u \cdot (\omega + \Omega) + v. \quad (11)$$

Зависимость интенсивности выходного тока фотоприемника от смещения центральной частоты а-ВБР примет вид:

$$P(t) = (u \cdot \omega + v)^2 + (u \cdot (\omega + \Omega) + v)^2 + 2(u \cdot \omega + v)(u \cdot (\omega + \Omega) + v) \cdot \cos(\Omega t) . \quad (12)$$

Выражение (12) позволяет ввести единственный измеряемый параметр – коэффициент модуляции, который связывает параметры колебания интенсивности выходного тока фотоприемника со смещением центральной частоты А-ВБР.

Коэффициент модуляции колебаний интенсивности выходного тока фотоприемника записывается классическим выражением отношения разности максимальной и минимальной амплитуд колебаний к их сумме, что в свою очередь равно отношению амплитуды гармонической части (12) к постоянному уровню мощности:

$$M(\omega) = \frac{2A(\omega)B(\omega)}{A(\omega)^2 + B(\omega)^2} = \frac{2(u \cdot \omega + v)(u \cdot (\omega + \Omega) + v)}{(u \cdot \omega + v)^2 + (u \cdot (\omega + \Omega) + v)^2} . \quad (13)$$

Характерная зависимость величины коэффициента модуляции от смещения центральной частоты а-ВБР приведена на рисунке 6.

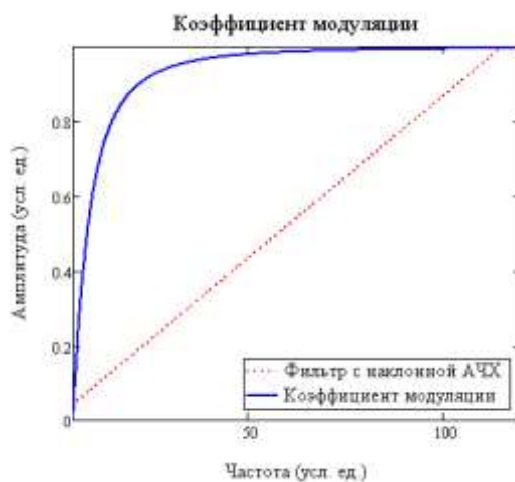


Рис. 6. Зависимость коэффициента модуляции на фотоприемнике от смещения центральной частоты А-ВБР

Как видно из рисунка 6, коэффициент модуляции монотонно меняется при смещении центральной частоты А-ВБР. То есть, можно однозначно определить обратную функцию $\omega(M)$, которая позволит определить смещение центральной частоты А-ВБР в зависимости от измеренного значения коэффициента модуляции $M(\omega)$.

Зависимость коэффициента модуляции от смещения центральной частоты А-ВБР, разностной частоты А-ВБР и параметров фильтра с наклонной АЧХ является калибровочной характеристикой каждого такого сенсора и поставляется вместе с датчиком. Решение задачи обеспечения равномерности шкалы измерений и независимости определения центральной частоты от возможных флуктуаций мощности светового потока, не связанных с изменением ее центральной частоты, решены в [1] и в данной работе не рассматриваются. Отметим только, что первая задача решается за счет использования фильтра с нелинейной наклонной характеристикой в амплитудно-частотной плоскости, а вторая задача решается за счет введения опорного светового канала, независимо принимающего световой поток до фильтра с наклонной АЧХ, а вычисления ведутся с отношением мощностей в опорном и измерительном каналах.

Таким образом мы показали, что задача опроса одиночной А-ВБР структуры сложности не представляет и решается однозначно. Вместе с тем, включение

в измерительную систему второго А-ВБР датчика может существенно усложнить метод измерительного преобразования, поскольку на фотоприемнике будут происходить перекрестные биения уже не двух частотных составляющих, образующих адрес одиночной А-ВБР, а уже четырех частотных составляющих, две из которых формируют адрес первой А-ВБР, а две других адрес второй. В этом случае в электрическом сигнале после фотоприемника будут присутствовать не только адресные частоты, но и частоты, соответствующие перекрестным биениям левой частотной составляющей первого датчика с левой и правой частотными составляющими второго датчика, и соответственно правой частотной составляющей первого датчика с левой и правой частотными составляющими второго датчика. Всего же на фотоприемнике будет формироваться шестичастотный сигнал, две частоты из которых являются адресными частотами, а четыре остальные являются следствием двухчастотной природы А-ВБР. Сама по себе обработка шести частотного сигнала с фильтрацией его на адресных частотах не представляет особой проблемы, но только до тех пор, пока четыре дополнительные частоты случайно не совпадут с адресными частотами или не произойдет случайного совпадения оптических частот, формирующих адреса А-ВБР. Покажем, что и в этом случае информационной коллизии не происходит и задача может быть решена.

Рассмотрим математическую модель измерительной системы, содержащей два (А-ВБР₁ и А-ВБР₂) датчика с адресными частотами Ω_1 и Ω_2 . Без потери общности примем:

$$\Omega_1 > \Omega_2 . \quad (14)$$

На рисунке 7 приведена оптико-электронная схема опроса двух А-ВБР структур, где использованы обозначения: 1 – лазерный источник с частотой излучения эквивалентной диапазону изменения оптических частот; 6, 9 – оптоволоконные разветвители и 10 – объединитель мощности; 2.1 и 2.2 – А-ВБР датчики; 3 – фильтр с наклонной АЧХ; 4, 7 – измерительный и опорный фотоприемники; 5, 8 – измерительный и опорный АЦП.

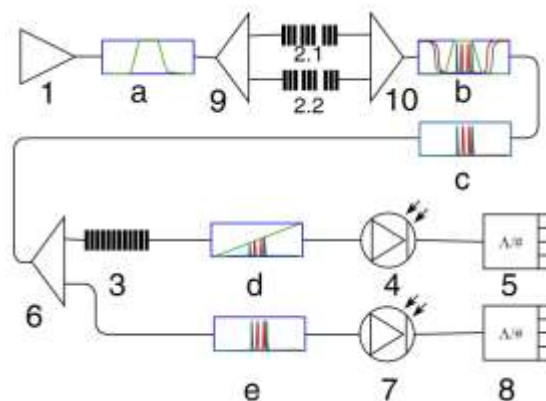


Рис. 7. Оптико-электронная схема опроса двух А-ВБР структур

Лазерный источник с частотным диапазоном, эквивалентным диапазону изменения оптических частот А-ВБР – 1, формирует лазерное излучение (а), которое делится на два одинаковых по мощности потока (на разветвителе – 9) и проходит через две А-ВБР структуры – 2.1 и 2.2; двухчастотное адресное излучение, сформированное в А-ВБР объединяется (сумматор – 10), а затем делится (разветвитель – 6) на измерительный и опорный световые потоки. Измерительный световой поток пропускается через фильтр с наклонной АЧХ – 3, затем оба потока принимаются каждый на свой фотоприемник – 4, 7 и оцифровываются – 5, 8. Измерительное преобразование производится для отношения мощностей в измерительном и опорном каналах.

Оптический сигнал, полученный от прохождения излучения через два датчика а-ВБР и попадающий на фотоприемник, можно записать в виде:

$$F(t) = \left| A_1 \cdot e^{j\omega_1 \cdot t} + B_1 \cdot e^{j(\omega_1 + \Omega_1) \cdot t} + A_2 \cdot e^{j\omega_2 \cdot t} + B_2 \cdot e^{j(\omega_2 + \Omega_2) \cdot t} \right|^2, \quad (15)$$

где A_1 и A_2 – амплитуды левых и B_1 и B_2 – амплитуды правых частотных составляющих, формирующих адрес а-ВБР, ω_1 и ω_2 – частоты левых и $\omega_1 + \Omega_1$ и $\omega_2 + \Omega_2$ – частоты правых частотных компонент а-ВБР.

Электрический сигнала на выходе фотоприемника пропорционален:

$$P(t) = \left(\frac{A_1^2 + B_1^2 + A_2^2 + B_2^2}{2} \right) + (A_1 B_1 \cos(\Omega_1 t) + A_2 B_2 \cos(\Omega_2 t)) + \left[A_1 A_2 \cos(\omega_1 - \omega_2) t + A_1 B_2 \cos(\omega_1 - \omega_2 - \Omega_2) t + B_1 A_2 \cos(\omega_1 - \omega_2 + \Omega_1) t + B_1 B_2 \cos(\omega_1 - \omega_2 + \Omega_1 - \Omega_2) t \right]. \quad (16)$$

Выражение (14) позволяет однозначно определить положение А-ВБР₁ и А-ВБР₂ структур почти всегда, кроме двенадцати случаев, когда частоты, возникающие в одном из четырех слагаемых в квадратных скобках, совпадают с адресными частотами Ω_1 или Ω_2 А-ВБР₁ и А-ВБР₂ структур. В [1] решена задача определения положения каждой А-ВБР как в общем случае, так и в случае возникновения в измерительной системе частот, совпадающих с адресными. Алгоритм, приведенный выше, может быть с успехом применим и в данном случае.

Существует еще один подход к построению двухсенсорной системы, позволяющий однозначно определить положение каждого из А-ВБР датчиков и заключается он в том, чтобы за счет подбора параметров А-ВБР, не допустить в измерительной системе частот, которые могут случайно совпасть с адресными частотами. На рисунке 8 приведена схема амплитудно-частотной характеристики прохождения светового излучения через две А-ВБР структуры, центральные частоты которых разнесены друг относительно друга на значительное расстояние.

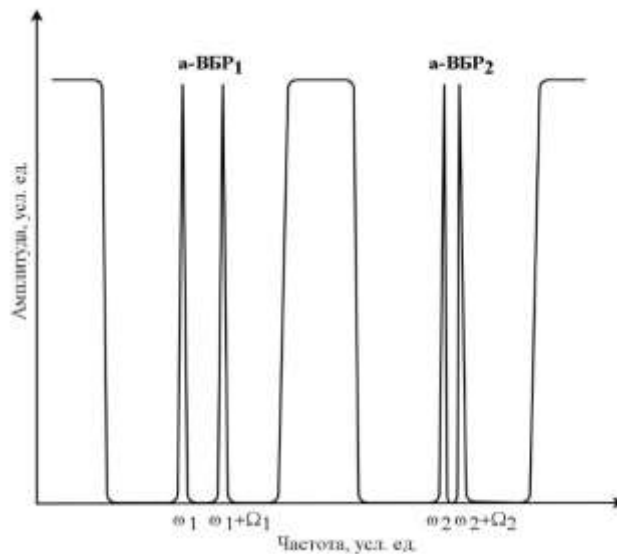


Рис. 8. Схема амплитудно-частотной характеристики прохождения широкополосного лазерного излучения через две А-ВБР структуры

Разнос центральных частот А-ВБР между собой на значительное расстояние (свыше 1,0–1,2 ТГц) при полной ширине А-ВБР на половине высоты (0,3–0,54 ТГц) и адресных частотах до 40 ГГц, позволяет избежать коллизий, связанных с возникновением в (16) совпадающих частот с адресными.

Дополнительно к этому, разнос центральных частот А-ВБР между собой на значительное расстояние позволяет проводить последовательное включение двух (а в общем случае и более) А-ВБР структур в одно оптическое волокно, что было бы невозможно в случае близких центральных частот А-ВБР. При близких центральных частотах на засветку адресных частотных компонент А-ВБР, следующей за первой, не хватало бы света, поскольку он блокировался бы предыдущей А-ВБР.

Исключение в третьем слагаемом (в квадратных скобках) (16) возникновения частот, совпадающих с адресными частотами Ω_1 и Ω_2 , позволяет использовать фильтрацию (16) на адресных частотах без риска попадания в амплитуду сигналов на адресных частотах посторонних, не связанных с воздействием давления, вкладов.

На рисунке 9 приведена оптико-электронная схема катетера высокого разрешения, включающего в себя внешний модуль и погружную часть зонда с датчиками. Датчики объединены в две группы по месту их расположения – три на одном конце зонда, три на другом и в три группы по топологии их подключения.

Определим диапазон изменения центральной длины волны оптоволоконного датчика в 2 нм, получим, что требуемая разрешающая способность определения центральной длины волны составит 0,3–1,5 пм для определения центральной частоты, что является вполне достижимой величиной для радиофотонных методов измерений.

Лазерный источник ЛИ (рисунок 9) направляет широкополосное лазерное излучение, которое, проходя через полосовой фильтр ПФ, формирует излучение, эквивалентное частотным диапазонам смещения центральных частот, входящих в измерительную систему А-ВБР датчиков. Сформированное излучение делится делителем СД на три оптических канала, в каждом из которых располагаются по два А-ВБР датчика (первый на одном, второй на другом конце зонда).

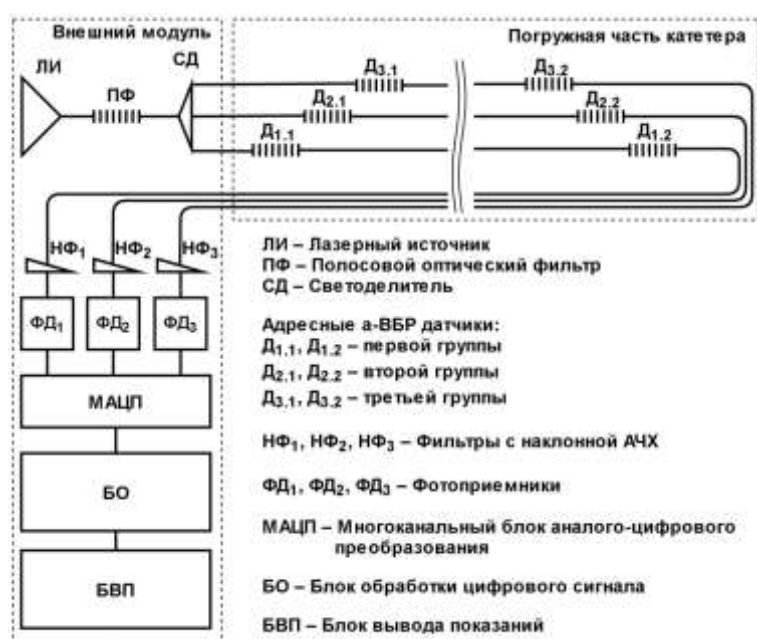


Рис. 9. Оптико-электронная схема катетера высокого разрешения

В каждом оптическом канале лазерное излучение, проходит через два А-ВБР датчика и проходит через фильтр с наклонной АЧХ, который асимметрично меняет амплитуды

частотных компонент, формирующих адресные частоты, после чего принимается на фотоприемнике. Электрический сигнал с каждого фотоприемника независимо оцифровывается на многоканальном АЦП и поступает в блок обработки, где осуществляется фильтрация сигналов в каждом канале на адресных частотах А-ВБР. После фильтрации сигнала на адресных частотах в режиме реального времени производится определение центральных частот А-ВБР датчиков согласно методике измерительного преобразования, описанной в разделе 2.2 настоящей главы, и вычисление показаний давления с выводом данных на монитор исследователя БВП.

Центральные и адресные частоты А-ВБР датчиков в каждом оптическом канале подбираются таким образом, чтобы, во-первых, исключить совпадение адресных частот, во-вторых, исключить пересечение спектров А-ВБР, так, чтобы их можно было включать последовательно вдоль одного участка волокна и одновременно избежать возникновения после фотоприемника частот, совпадающих с адресными.

Поскольку прием, обработка и анализ данных в каждом оптическом канале производится независимо, адресные и центральные частоты А-ВБР в каждом из оптических каналов могут быть выбраны одинаковыми, чтобы унифицировать элементную базу. То есть, можно допустить, а еще лучше потребовать, совпадения центральных и адресных частот между собой у $D_{1.1}$, $D_{2.1}$, $D_{3.1}$ и между собой у $D_{1.2}$, $D_{2.2}$, $D_{3.2}$.

Для каждой из двух А-ВБР, входящей в один оптический канал, может быть использован как собственный фильтр с наклонной АЧХ, так и один общий фильтр с наклонной АЧХ. А можно в качестве фильтра с наклонной АЧХ использовать специальным образом синтезированную ВБР, каждый из склонов которой будет использован в качестве наклонного фильтра отдельно для А-ВБР (рисунок. 10,а), что обеспечивает прием на фотодетекторе светового потока, спектр которого представляет собой четырехчастотное излучение, приведенное на рисунке. 10,б. Причем, выполнение требования исключения совпадения перекрестных частот адресным частотам А-ВБР позволяет обеспечить не только непересечение спектров А-ВБР₁ и А-ВБР₂, но и гарантировать то, что расстояние между ними всегда будет больше любой из адресных частот, входящих в оптический измерительный канал.

Заметим, что в качестве полосового фильтра, входящего в измерительную систему, могут быть использованы специальным образом структурированные волоконные брэгговские решетки.

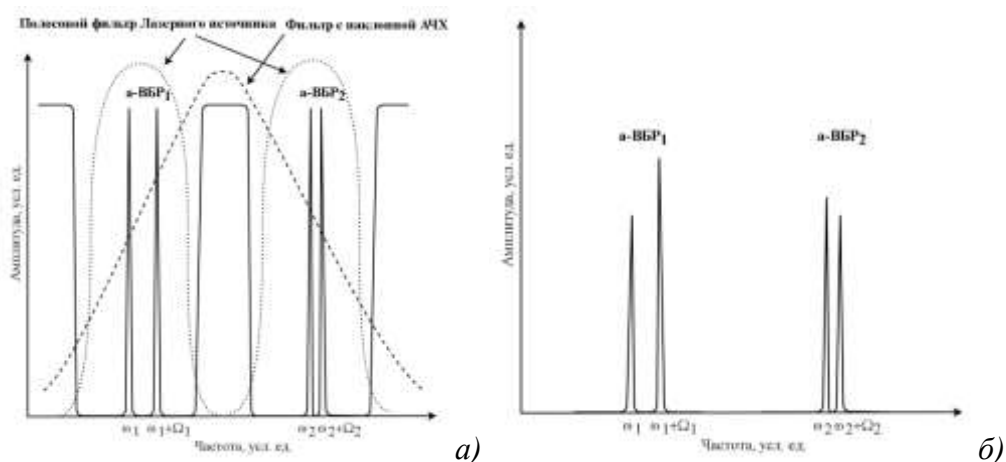


Рис. 10. Схема амплитудно-частотной характеристики прохождения широкополосного лазерного излучения через две А-ВБР структуры с наложенным фильтром с наклонной АЧХ и полосовым фильтром после лазерного источника

Требование унификации параметров датчиков в каждом из трех оптических каналов, автоматически ведет к тому, что и фильтры с наклонной АЧХ (НФ₁, НФ₂ и НФ₃, рисунок 9) должны быть одинаковы. Что не только упрощает требования к их созданию, но и упрощает задачу их температурной стабилизации.

Унифицированные А-ВБР структуры, фильтры с наклонной АЧХ и фотоприемники позволяют в рамках компьютерного и математического моделирования каждый из оптических каналов рассматривать отдельно, поскольку прием и обработка сигналов с них производится независимо. Более того, разнесение центральных частот А-ВБР в одном измерительном канале позволяет рассматривать каждый А-ВБР датчик независимо.

Заключение

В работе проанализированы особенности построения малосенсорных измерительных систем на базе адресных волоконных брэгговских структур с радиофотонным методом их опроса. Сделана постановка задачи малосенсорной измерительной системы манометрии высокого разрешения с двумя группами датчиков.

Приведен метод измерительного преобразования и математическая модель на его основе, описывающие прохождение широкополосного лазерного излучения через спектрально-адресную ВБР и включающие в себя оптико-электронную схему опроса одиночной спектрально-адресной ВБР. Рассмотрена математическая модель излучения, формируемого окнами прозрачности спектрально-адресной ВБР, и упрощение этой модели для сверх узких окон прозрачности. Обсуждается использование единственного измеряемого параметра, величина которого монотонно зависит от смещения центральной частоты спектрально-адресной ВБР. предложен подход к опросу двух А-ВБР структур с последовательным включением их в одно оптическое волокно, с одновременным устранением проблем, связанных с возникновением в измерительной системе ложных частот, совпадающих с адресными частотами А-ВБР.

Предложена оптико-электронная схема малосенсорной измерительной системы, учитывающей группировку датчиков по месту их расположения и по оптическим измерительным каналам. Показано, что в оптических измерительных каналах можно использовать два последовательно включенных спектрально-адресных А-ВБР датчика с разнесенными центральными частотами. Решена задача унификации элементной базы в малосенсорной измерительной системе. Показано, что за счет унификации элементной базы в системе могут быть использованы только два типа А-ВБР структур в качестве чувствительных элементов датчиков, один тип фильтров с наклонной АЧХ и один тип полосовых фильтров, накладываемых на исходное излучение. Показано, что предложенная оптико-электронная схема малосенсорной измерительной системы может быть расширена до многосенсорной измерительной системы путем простого увеличения количества измерительных каналов, фотоприемников, фильтров с наклонной АЧХ и каналов оцифровки данных. Показано, что ограничение это связано только с ограничением на энергетический бюджет всей оптической системы в целом. Предложенная оптико-электронная схема опроса является универсальной и может быть использована для построения измерительных систем для любых приложений.

Таким образом, решена задача малосенсорных манометрических измерений с высоким разрешением на примере мониторинга сфинктеров пищевода с помощью спектрально-адресных ВБР. Во-первых, они по своей конструктивной форме адаптированы к уже применяющимся в гастроскопии приборам. Во-вторых, позволяют использовать унифицированную доступную по стоимости элементную базу. В-третьих, позволяют производить точные замеры за счет радиофотонной обработки сигнала.

Финансирование: Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках программы «Приоритет 2030».

Литература

1. Сахабутдинов, А.Ж. Радиофотонные сенсорные системы на адресных волоконных брэгговских структурах и их применение для решения практических задач: Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. - Казань, 2018.
2. Мисбахов, М. Волоконные брэгговские решетки с двумя фазовыми сдвигами как чувствительный элемент и инструмент мультиплексирования сенсорных сетей/ М. Мисбахов; Р.Ш. Мисбахов, О.Г. Морозов и др. // Инженерный вестник Дона. - 2017. - 46, 24.
3. Патент № RU 179264 U1 Российская Федерация, Волоконно-оптический термометр: № 2017139611; заявл. 14.11.2017: опубл. 07.05.2018 / О.Г. Морозов, И.И. Нуреев, А.Ж. Сахабутдинов, А.А. Кузнецов.
4. Морозов, О.Г.; Сахабутдинов, А.Ж. Адресные волоконные брэгговские структуры в квазираспределённых радиофотонных сенсорных системах / Морозов О.Г.; Сахабутдинов А.Ж. // Компьютерная оптика. - 2019. - 43, 535–543.

Low-sensor microwave photonics addressable measurement systems for high-resolution manometry

Purtov V.¹, Alhussein Alaa Naji Dakhal²

¹ Infocom-SPB LLC

40, 27-BU, Engels Avenue, St. Petersburg, 194156, Russian Federation,

² Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI
10, K. Marx, Kazan, 420011, Russian Federation

Abstract. The paper presents the results of a study of the optomechanics of narrow-band classical fiber Bragg gratings (FBGs) with a small mode coupling coefficient and spectrally-addressable information recorded in them by various methods by introducing two symmetric phase π -shifts into their structure. An analysis of the passage of broadband laser radiation through spectrally-addressable FBGs (addressable-FBGs, A-FBGs) in low-sensor applications is carried out. A theoretical substantiation of the methods for measuring pressure and temperature is given, including compensation for the effect of temperature in manometry. A technique for radiophotonic measuring conversion and determination of its main methodological errors are proposed. The problem of pressure monitoring in the upper and lower sphincters of the esophagus is stated (three sensors for each sphincter with a distance of 0.5–1 cm between the sensors). The proposed sensitive elements are an A-FBG array with a small mode coupling coefficient and spectral-address information determined by the presence of two symmetric discrete phase π -shifts. The theoretical and mathematical basis of the measuring transformation method is substantiated. In addition to the mathematical model, a method is proposed to ensure the uniformity of the measurement scale in the entire range of the central wavelength shift of the sensors and a method for compensating for fluctuations in the optical radiation power in the entire system as a whole. The optical-electronic circuit of the measuring system includes six sensors grouped into two groups by their location and into three groups by their connection topology. The correctness of the proposed circuit and its compliance with the problem statement and the measuring transformation method are substantiated, including the requirement for the unambiguous determination of the amplitudes at the address frequencies of the sensors.

Keywords: mathematical modeling, address fiber Bragg structures, high resolution manometry, microwave photonics.

Статья отправлена в редакцию 25 ноября 2024 г.