

Физика волновых процессов и радиотехнические системы

УДК 621.383
DOI 10.18469/1810-3189.2019.22.4.163-174

Дата поступления: 08.10.2019
Дата принятия: 06.11.2019

Многосенсорная радиофотонная адресная измерительная система для манометрии кишечника

А.Ф. Аглиуллин¹, В.В. Пуртов², А.Ж. Сахабутдинов³,
И.И. Нуреев³, А.А. Тяжелова³, Л.М. Сарварова³, С.В. Васильев⁴,
И.У. Курбиев⁵, А.Д. Проскураков⁵, В.В. Кадушкин⁵

¹ ООО «Научно-производственная фирма МФС»
420087, Российская Федерация, г. Казань
ул. Аделя Кутуя, 163А

² ООО «Инфоком-СПб»
194156, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург
пр. Энгельса, 27, корп. 40, литера БУ

³ Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева - КАИ
420111, Российская Федерация, г. Казань
ул. К. Маркса, 10

⁴ АО «Научно-производственный концерн «Технологии машиностроения»
125212, Российская Федерация, г. Москва
Ленинградское шоссе, 58, стр. 4

⁵ ООО «НПК «Сенсорика»
121205, Российская Федерация, г. Москва
Сколково, Инновационный Центр, бульвар Большой, 42, стр. 1

Решения для многосенсорного катетера в манометрии высокого разрешения на базе классической интеррогации с волновым разделением волоконно-оптических датчиков или их полигармоническим зондированием уже существуют. Предложены и измерительные системы, основанные на опросе массивов однотипных брэгговских решеток методом интерференции со сдвигом по частоте и пространственным разделением получения информации с каждой решетки в отдельности, хотя их пространственное разрешение несколько ниже требуемого. Указанный тип решений требует дорогостоящих перестраиваемых лазеров или узкополосных фильтров, а интерференция со сдвигом по частоте, в том числе и двухчастотная, с радиофотонным методом опроса, влечет за собой построение крайне сложной интерферометрической оптико-электронной схемы с необходимостью обеспечения ее стабильной работы. Дополнив задачу требованием максимально упростить и удешевить систему за счет радиофотонных методов зондирования и использования в системе массива структурированных решеток или решеток с фазовым сдвигом, и, наконец, активно развиваемых нами адресных волоконных брэгговских решеток, получим полную постановку задачи построения многосенсорного катетера для манометрии кишечника, результаты решения которой представлены в данной статье.

Ключевые слова: давление в кишечнике, катетер, волоконная брэгговская решетка с двумя фазовыми сдвигами, многосенсорная измерительная система, радиофотонный опрос сенсоров.

Введение

Задачи контроля давления в организме человека не ограничивается задачами контроля артериального давления или контроля давления в верхнем и нижнем сфинктерах пищевода или отдельных контрольных точках человеческого организма [1–8]. Существуют задачи, в которых необходим распределенный контроль давления, вдоль протяженных участков. В частности, к таким задачам относится контроль перистальтики трубчатых органов и полостей в организме – пищевода, желудка, кишечника, мочеточников и пр. Фактически, стоит задача распределенного или квазираспределенного контроля давления на протяженных (от

0,1 до 6,0 м) участках трубчатых полостей. Перистальтические волны продвигаются со скоростями 1–3 мм/с, достигая максимальных значений 70–210 мм/с в случае пропульсивной (стремительной) перистальтической волны.

Казалось бы, хорошим решением могут быть классические распределенные измерительные системы, построенные на принципах оптоволоконной рефлектометрии во временной или в частотной области или поляризационной временной рефлектометрии. Однако, требуемое пространственное разрешение в 10–20 мм не позволяет применять указанные методы в силу низкого пространственного разрешения распределенных методов измерений, которое в настоящий момент

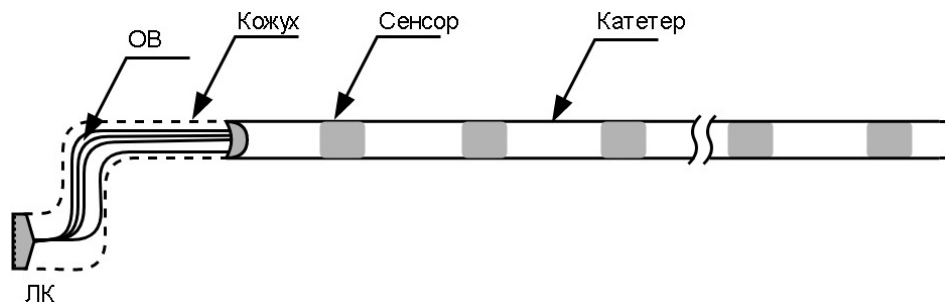


Рис. 1. Схема многосенсорного зонда высокого разрешения: ОВ – оптические волокна; ЛК – линейный МТР/МРО коннектор

развития техники не позволяет их использовать. Вместе с тем, распределенный контроль давления может без существенных информационных потерь быть заменен квазираспределенным контролем с интервалом точек съема показаний давления в 10–20 мм. Размеры и внешняя конструкция зонда должна соответствовать принятым в области стандартам. Так, зонд для перистальтики кишечника представляет собой гибкую трубку с внешним диаметром 15–20 мм, длиной до 1500 мм и общим числом датчиков от 6 до 72 штук. Внутри гибкой трубки зонда, диаметром от 10 до 15 мм, располагаются датчики давления и каналы приема и передачи информации с них [1].

Решения для многосенсорного катетера в манометрии высокого разрешения на базе классической интеррогации с волновым разделением датчиков или их полигармоническим зондированием уже существуют [9–18]. Предложены и измерительные системы, основанные на опросе массивов однотипных брэгговских решеток методом интерференции со сдвигом по частоте и пространственным разделением получения информации с каждой решетки в отдельности, хотя их пространственное разрешение несколько ниже требуемого. Более того, существуют радиофотонные методы опроса массива однотипных брэгговских решеток методом интерференции со сдвигом по частоте. Первый тип решений требует дорогостоящих перестраиваемых лазеров или узкополосных фильтров, а интерференция со сдвигом по частоте, в том числе и двухчастотная, с радиофотонным методом опроса, влечет за собой построение крайне сложной интерферометрической оптико-электронной схемы с необходимостью обеспечения ее стабильной работы.

Дополнив задачу требованием максимально упростить и удешевить систему за счет радиофотонных методов зондирования и использования в системе массива структурированных решеток или решеток с фазовым сдвигом [19–21], и, наконец, активно развиваемых нами адресных волоконных

брэгговских решеток [22–27], получим полную постановку задачи, результаты решения которой представлены в данной статье.

1. Многосенсорные радиофотонные измерительные системы на адресных волоконных брэгговских решетках

Диапазон измерения давления в кишечнике [1] должен находиться в пределах от 0 до 13,3 кПа (от 0 до 100 мм. рт. ст.), с частотой съема информации не менее 8 Гц, и разрешающей способностью до 0,01 от максимального измерительного диапазона шкалы (около 130 Па или 1 мм. рт. ст.). Учитывая возможный диапазон изменения центральной длины волны чувствительного элемента на базе волоконной брэгговской решетки порядка 250 ГГц (2 нм), следовательно, необходимо обеспечить разрешающую способность определения центральной частоты в 2,5 ГГц (20 пм).

Таким образом, измерительная система должна представлять собой зонд (катетер), который содержит от шести до семидесяти двух датчиков давления. В рабочем режиме показания снимаются со всех датчиков одновременно. Предполагается, что в штатном режиме работы температура тела для всех датчиков давления одинакова, вместе с тем, в системе могут быть предусмотрены датчики температуры, распределенные вдоль зонда. Схема конструкции зонда приедена на рис. 1.

Многосенсорный зонд подключается к внешнему блоку обработки (на рис. 1 не отображен) в котором расположен источник лазерного излучения, элементы оптико-электронной системы распределения, приема и компьютерной обработки сигнала и модуль вывода результатов на экран монитора.

2. Оптико-электронная схема многосенсорного катетера

Задача построения многосенсорной измерительной системы может быть решена за счет объ-

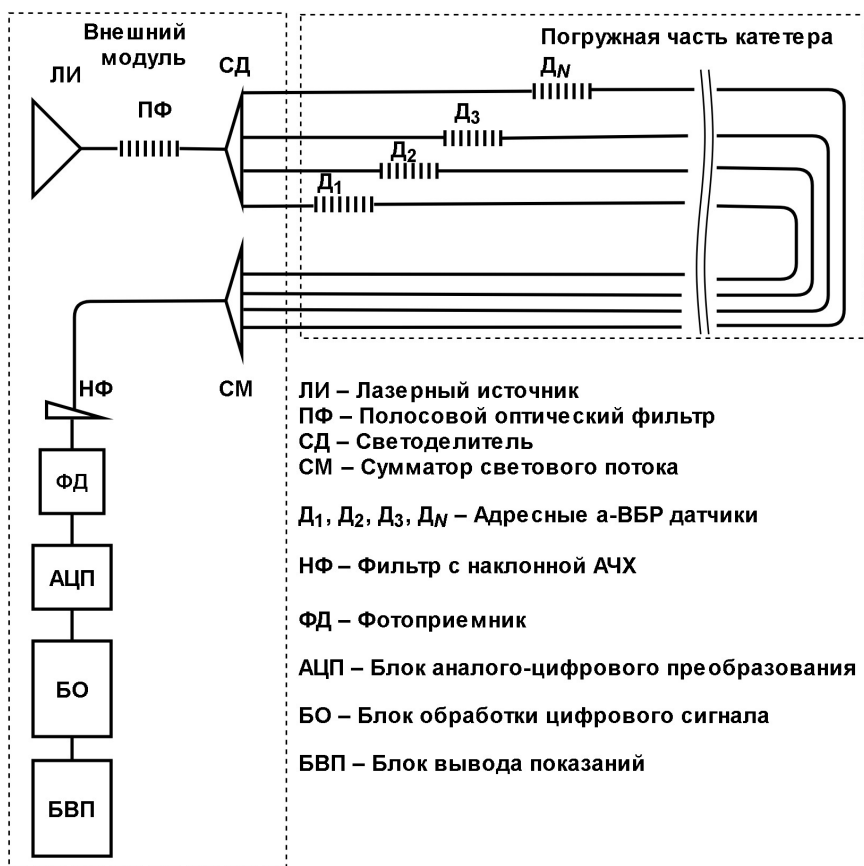


Рис. 2. Оптико-электронная схема многосенсорной измерительной системы

единения обработки всех оптических каналов на одном фотоприемнике и с использованием одного фильтра с наклонной амплитудно-частотной характеристикой. За счет уменьшения количества элементов (сокращения числа фильтров с наклонной АЧХ, фотоприемников и АЦП от нескольких десятков до одного) упрощается задача контроля температурной стабилизации фильтров с наклонной АЧХ, а общее уменьшение количества элементов повышает стабильность конструкции в целом.

Мультиплексирование всех сенсоров в одном оптическом канале влечет за собой необходимость обеспечения адресного съема информации с каждого сенсора. Одновременно с этим становится невозможным использование двух склонов фильтра с наклонной амплитудно-частотной характеристикой, поскольку объединение оптического сигнала в один общий канал, как будет показано далее, вызывает множественные перекрестные биения частотных компонент, формирующих адрес а-ВБР, что при разнесении их на два фильтра с наклонными АЧХ приводит к потере информации даже при разнесении центральных частот а-ВБР. Эту задачу можно решить за счет использования сенсоров на базе а-ВБР с взаимно неравными между собой адресами и одинаковой

центральной частоте датчиков. Оптико-электронная схема многосенсорной измерительной системы приведена на рис. 2.

Уменьшение количества датчиков в каждом оптическом тракте вдвое (с двух до одного) влечет за собой двойное увеличение количества самих оптических трактов. Следовательно, во внутреннюю часть зонда должно быть уложено 72 оптических волокна.

С учетом разворота оптических волокон в одном жгуте их должно быть 144 штуки. Несмотря на двойное увеличение количества оптических волокон, задача укладки их во внутреннюю часть зонда не усложняется, поскольку, как уже было сказано выше, даже при неплотной укладке на 72 оптических волокна требуется 4 квадратных миллиметра, следовательно, на укладку 144 оптических волокон потребуется не более 8 квадратных миллиметров.

Оптико-электронная схема, приведенная на рис. 2 предполагает использование единого источника лазерного излучения, генерирующего непрерывное по частоте лазерное излучение в диапазоне, эквивалентном диапазону изменения центральных длин волн всех а-ВБР датчиков входящих в систему.

Полосовой фильтр ПФ используется опционально, в том случае, если частотный диапазон излучения лазерного источника выходит за максимальные пределы частотного диапазона хождения а-ВБР. Использование ограниченного частотного диапазона (2–3 нм) при мощном лазерном источнике позволяет не потерять информационный сигнал и сохранить достаточное отношение сигнал/шум при делении его по мощности на 72 оптических тракта.

Далее световой поток посредством оптического делителя мощности разделяется на 72 оптических тракта в каждом из которых располагается а-ВБР сенсор с уникальной для данной измерительной системы адресной частотой.

Прошедшие через а-ВБР сигналы объединяются в один оптоволоконным сумматором мощности. После чего, амплитуды частотных составляющих, формирующих адреса а-ВБР, асимметрично меняются путем подачи сложного сигнала на фильтр с наклонной АЧХ (НФ). После чего результирующий сигнал подается на фотоприемник.

3. Принципы обработки сигналов в многосенсорном катетере

Схема спектральной характеристики полигармонического сигнала, поступающего на фотоприемник (ФД) приведена на рис. 3, разной толщиной линий на рисунке изображены частотные составляющие одной и той же а-ВБР.

Амплитуды левой частотной составляющей ожидаемо меньше, чем амплитуда правой частотной составляющей в следствии прохождения сигнала через НФ.

Выходной сигнал после ФД, как нелинейного квадратичного элемента, будет пропорционален сумме постоянной составляющей и перекрестных биений оптических частотных составляющих, входящих в сигнал. Выведем математические соотношения, описывающие форму выходного сигнала после фотоприемника.

Сигнал, формируемый одной а-ВБР структурой перед фотоприемником, согласно методике, предложенной в [22], можно записать как сумму колебаний левой и правой оптических несущих:

$$R_i(t) = A_i \sin\left(\left(\omega_i - \frac{\Omega_i}{2}\right)t\right) + B_i \sin\left(\left(\omega_i + \frac{\Omega_i}{2}\right)t\right). \quad (1)$$

В (1) использованы следующие обозначения: i – порядковый номер а-ВБР сенсора в системе, A_i и B_i – амплитуды левой и правой оптических несущих,

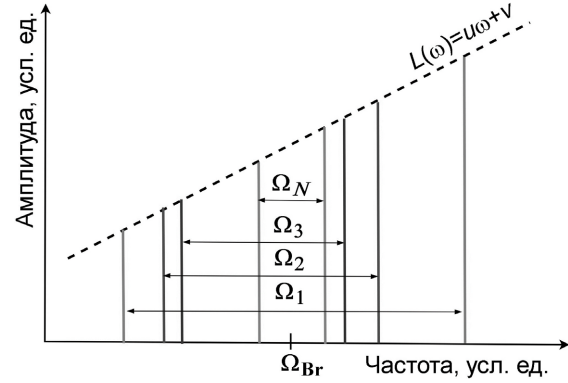


Рис. 3. Схема спектральной характеристики оптического сигнала прошедшего через массив а-ВБР и поступившего на ФД

щих, Ω_i – адресная частота а-ВБР, $R_i(t)$ – форма сигнала в амплитудно-временной области.

Общий мультиплексированный оптический сигнал, полученный от массива а-ВБР структур из N штук, после фотоприемника будет пропорционален квадрату суммы светового потока (1), поступающего от всех датчиков:

$$F(t) \sim \left[\sum_{i=1}^N R_i(t) \right]^2 = \left[A_i \sin\left(\left(\omega_i - \frac{\Omega_i}{2}\right)t\right) + B_i \sin\left(\left(\omega_i + \frac{\Omega_i}{2}\right)t\right) \right]^2, \quad (2)$$

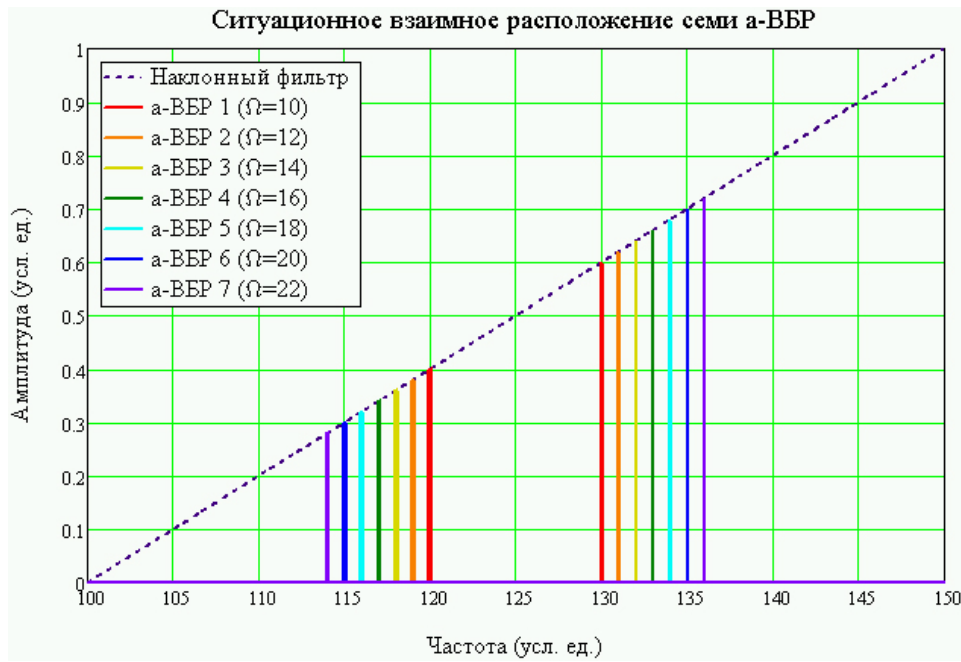
где N – общее количество датчиков в измерительной системе.

В результате получим:

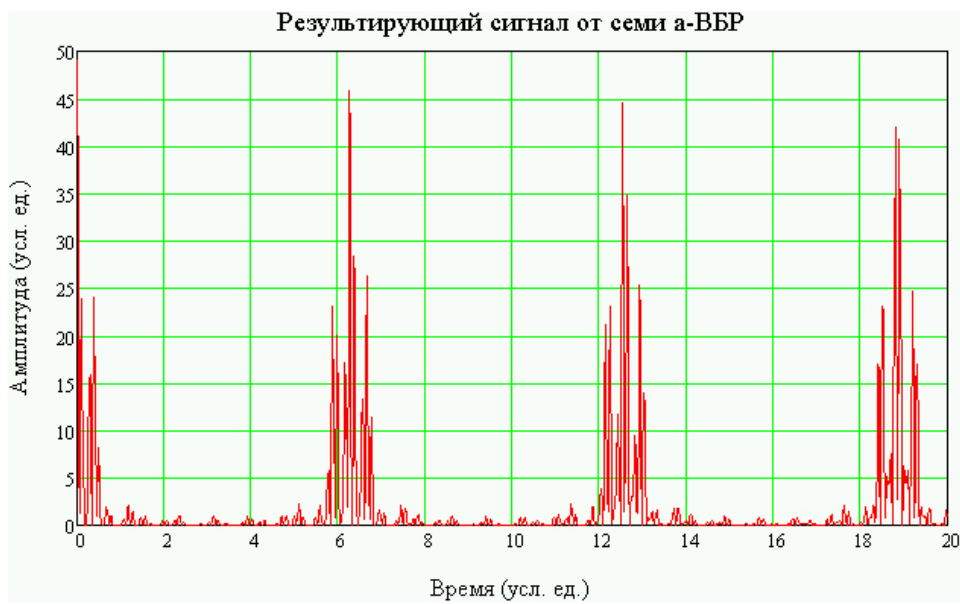
$$P(t) \sim \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^N \left[A_i A_k \cos[(\omega_i - \omega_k)t] + A_i B_k \cos[(\omega_i - \omega_k - \Omega_k)t] + B_i A_k \cos[(\omega_i - \omega_k + \Omega_i)t] + B_i B_k \cos[(\omega_i - \omega_k + \Omega_i - \Omega_k)t] \right]. \quad (3)$$

Входящие в (3) частоты являются разностными частотами всех входящих в (2) оптических частот. Можно переписать (3) отдельно выделив постоянный уровень сигнала, вклад от биений на адресных частотах Ω_i а-ВБР датчиков, и биения на перекрестных частотах:

$$P(t) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N (A_i^2 + B_i^2) + \sum_{i=1}^N A_i B_i \cos(\Omega_i t) + \sum_{i=1}^N \sum_{k=i+1}^N \left(A_i A_k \cos((\omega_i - \omega_k)t) + A_i B_k \cos((\omega_i - \omega_k - \Omega_k)t) + B_i A_k \cos((\omega_i - \omega_k + \Omega_i)t) + B_i B_k \cos((\omega_i - \omega_k + \Omega_i - \Omega_k)t) \right). \quad (4)$$



а)



б)

Рис. 4. Ситуационное взаимное расположение семи а-ВБР в амплитудно-частотной плоскости (а) и выходной ток фотоприемника (б)

Входящие в (4) амплитуды A_i и B_i формирующих адрес а-ВБР оптических несущих, напрямую зависят от параметров НФ:

$$\begin{aligned} A_i &= L_0 \left(u \left(\omega_i - \frac{\Omega_i}{2} \right) + v \right), \\ B_i &= L_0 \left(u \left(\omega_i + \frac{\Omega_i}{2} \right) + v \right). \end{aligned} \quad (5)$$

где u и v – угловой коэффициент и свободный член уравнения, описывающего параметры фильтра с наклонной линейной АЧХ, а L_0 – амплитуда оптических несущих исходного сигнала до фотоприемника.

Определив значения A_i , B_i и зная адресные частоты Ω_i для всех а-ВБР ($i = 1, N$), можно определить все ω_i – центральные (брэгговские) частоты всех а-ВБР сенсоров входящих в измерительную систему, что и является главной задачей метода.

На рис. 4, а показано ситуационное взаимное расположение семи а-ВБР в амплитудно-частотной плоскости, а на рис. 4, б выходной ток ФД. Центральная (брэгговская) частота всех а-ВБР принята равной 125 усл. ед. с адресными частотами 10, 12, 14, 16, 18, 20 и 22 усл. ед., соответственно.

Как можно видеть из изображенных на рис. 4, а положений центральных (брэгговских) частот всех

семи а-ВБР, и величин адресных частот, только адресная частота седьмой а-ВБР, равная 22 усл. ед., будет входить в соотношение (3) лишь в виде одного слагаемого, поскольку образование частоты в 22 усл. ед. возможно лишь перекрестным биением двух оптических частот, тех, которые формируют адрес а-ВБР₇ (на рис. 4, а они крайние внешние).

Аналогичным образом обстоит дело и с адресной частотой а-ВБР₇, равной 10 усл. ед., она также входит в (3) в виде единственного слагаемого, поскольку в спектре, изображенном на рис. 4, а разностная частота 10 усл. ед. может быть сформирована только между двумя оптическими частотами, формирующими адрес а-ВБР₁ (на рис. 4, а они крайние внутренние). Адресные частоты остальных а-ВБР (12, 14, 16, 18 и 20 усл. ед.) входят в (3) и как биения адресных оптических частот а-ВБР и как перекрестные биения оптических частотных составляющих других а-ВБР.

Сложность нахождения амплитуд заключается в том, что сигнал, сформированный перекрестными биениями оптических несущих а-ВБР, является чрезвычайно сложным. И даже независимый анализ этого сложного сигнала на какой-то конкретной адресной частоте не несет в себе достаточной информации для определения амплитуд, а вместе с этим, и положения а-ВБР с этой адресной частотой.

Главная задача метода может быть решена только путем одновременного определения амплитуд всех а-ВБР, входящих в измерительную систему. Результирующий неизвестный сигнал выходного тока фотоприемника подвергнем процедуре параллельной частотной фильтрации на адресных частотах а-ВБР, получим соотношения:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^N [A_i A_k \cos[(\omega_i - \omega_k)t] F(\Omega_j, \omega_i - \omega_k) + \\ & + A_i B_k \cos[(\omega_i - \omega_k - \Omega_k)t] F(\Omega_j, \omega_i - \omega_k - \Omega_k) + \\ & + B_i A_k \cos[(\omega_i - \omega_k + \Omega_i)t] F(\Omega_j, \omega_i - \omega_k + \Omega_i) + \\ & + B_i B_k \cos[(\omega_i - \omega_k + \Omega_i - \Omega_k)t] \times \\ & \times F(\Omega_j, \omega_i - \omega_k + \Omega_i - \Omega_k)] = D_j \cos(\Omega_j + \phi_j), \\ & \forall j = \overline{1, N}. \end{aligned} \quad (6)$$

В (6) использована функция $F(\Omega, \omega)$, которая описывает частотный фильтр на адресной частоте Ω . Математически он может быть записан как прямоугольный частотный фильтр:

$$F(\Omega, \omega) = \begin{cases} 1, & |\Omega - \omega| < \sigma, \\ 0, & |\Omega - \omega| \geq \sigma, \end{cases} \quad (7)$$

или гауссовский фильтр:

$$F(\Omega, \omega) = e^{-\frac{(\Omega - \omega)^2}{2\sigma^2}}, \quad (8)$$

где σ – полоса пропускания фильтра.

Выбор вида математической записи фильтра в виде (7) или (8) большого значения не имеет. Суть его присутствия в (6) заключается в выключении или включении слагаемых, частоты которых не совпадают или совпадают с частотой фильтра.

В (6) известными величинами являются: N – количество а-ВБР, Ω_j – все адресные частоты ($j = \overline{1, N}$), и правые части соотношений – амплитуда колебаний выходного тока фотоприемника на Ω_j – фильтруемой адресной частоте, обозначенная D_j , всего – N уравнений. Неизвестными величинами в (6) являются амплитуды A_j и B_j всех а-ВБР – всего $2N$ неизвестных. То есть, неизвестных в два раза больше уравнений. Замкнуть систему уравнений и урвать количество неизвестных с количеством уравнений поможет характеристика (5), которая позволит установить однозначную связь между A_j и B_j :

$$B_j = A_j + u\Omega_j, \quad (9)$$

Соотношения (6) по сути являются системой уравнений для нахождения неизвестных величин A_j по известным измеренным значениям D_j , угловому коэффициенту u фильтра с наклонной линейной характеристикой в амплитудно-частотной плоскости и известными значениями адресных частот а-ВБР, входящих в измерительную систему. Окончательный вид (6) удобно представить как:

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^N [A_i A_k F(\Omega_j, \omega_i - \omega_k) + \\ & + A_i (A_k + u\Omega_k) F(\Omega_j, \omega_i - \omega_k - \Omega_k) + \\ & + (A_i + u\Omega_i) A_k F(\Omega_j, \omega_i - \omega_k + \Omega_i) + \\ & + (A_i + u\Omega_i) (A_k + u\Omega_k) \times \\ & \times F(\Omega_j, \omega_i - \omega_k + \Omega_i - \Omega_k)] = 2D_j, \\ & \forall j = \overline{1, N}. \end{aligned} \quad (10)$$

Система уравнений (10) нелинейная, ее решение может быть найдено только итерационно численными методами. Численные методы, как и любой итерационный процесс, требуют задания некоего начального условия с которого будет начинаться поиск решения. В [22] показано, что при выборе начальных значений вблизи точного решения итерационный метод всегда сходится к точному решению.

Процессы, измеряемые в манометрии высокого разрешения, протекают всегда гораздо медлен-

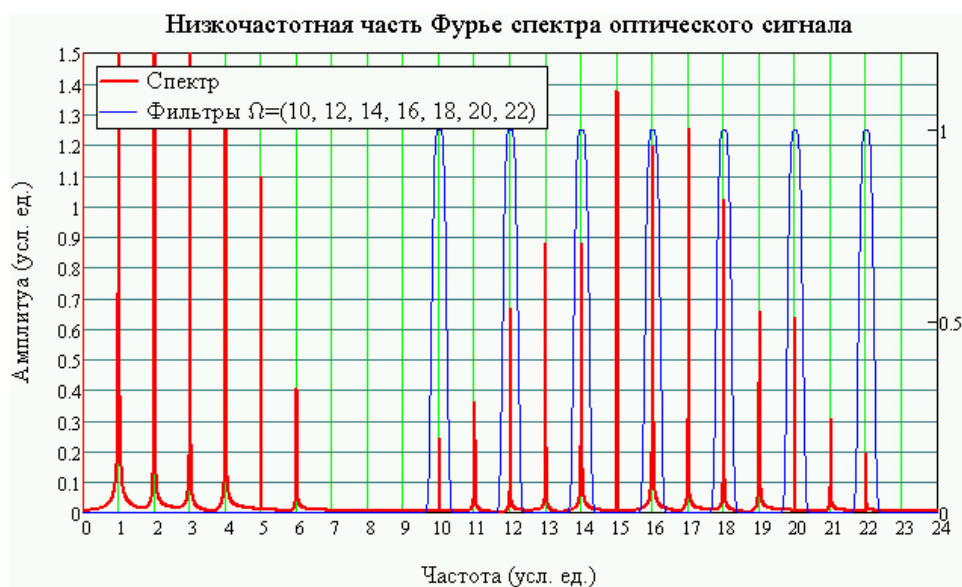


Рис. 5. Низкочастотная часть спектра выходного сигнала ФД отдельно (слева) и на фоне адресных частотных фильтров, соответствующих адресным частотам а-ВБР (справа)

нее (Гц), нежели скорость радиофотонных методов измерений (десятки, даже сотни кГц), следовательно, в качестве начальных приближений для поиска решения на следующем шаге по времени правомерно в качестве начальных приближений использовать значения, найденные на предыдущем расчетном шаге, поскольку вектор их значений лежит в окрестности вектора значений на текущем шаге по времени.

Полученный в результате компьютерного моделирования рис. 5 показывает, что в спектре выходного тока фотоприемника и в самом деле присутствуют перекрестные биения всех частотных составляющих, попарно формирующих адреса а-ВБР структур.

Истинная амплитуда колебаний а-ВБР с увеличением адресной частоты при постоянной центральной (брэгговской) частоте монотонно снижается, что не соблюдается на рис. 5 для распределения амплитуд колебаний на адресных частотах (заметим, что для ситуационного взаимного расположения а-ВБР, для которого сделан график, все центральные (брэгговские) частоты у семи а-ВБР совпадают, отличие только в адресных частотах). Такая картина связана с тем, что в сигнал колебаний на адресных частотах (12, 14, 16, 18 и 20) входят перекрестные биения попарно не адресных оптических частотных составляющих.

Определив амплитуды колебаний выходного тока фотоприемника на адресных частотах а-ВБР, проверим удовлетворяют ли они уравнениям. Для чего, подставим измеренную амплитуду выходного тока на адресных частотах в (10) и проверим равенство.

Имея начальные приближения с погрешностью в 1 %, алгоритм позволяет определить положение центральных частот а-ВБР с максимальной абсолютной погрешностью 0,128 усл. ед., что в свою очередь влечет величину ошибки определения центральной (брэгговской) длины волны а-ВБР в 1,026 пм, что является очень высоким показателем точности измерений для подобных систем (напомним, критерий данный в [1] – 20 пм).

Различные расположения а-ВБР относительно друг друга и фильтра с наклонной линейной АЧХ приводят к тому, что погрешность определения центральной (брэгговской) длины волны может меняться и доходить до 2 пм, но даже и в этом случае это остается очень высоким показателем разрешающей способности таких систем.

Результаты компьютерного моделирования были экспериментально подтверждены нами с использованием методик специальной калибровки а-ВБР, измерений их центральной длины волны, компенсации влияния температуры и использования специализированных стендов, представленных в [28–32].

4. Структурные и конструктивные решения для многосенсорного катетера кишечника

Оптико-электронная схема многосенсорной измерительной системы, (рис. 2) обеспечивает существенный выигрыш у других многосенсорных систем с последовательным включением датчиков за счет существенного сокращения количества

элементов в оптико-электронной схеме (не требуется спектральный интеррогатор). Существенная экономия может получиться за счет использования всего лишь одного фильтра с наклонной амплитудно-частотной характеристикой, одного фотоприемника и одного модуля аналого-цифрового преобразования.

К недостаткам многосенсорной оптико-электронной схемы стоит отнести необходимость использования отдельного оптического канала для каждого датчика в отдельности, что существенно может усложнить задачу сборки и монтажа оптической части конструкции. Кроме этого, многосенсорная схема требует применения а-ВБР принципиально разными адресами, что влечет за собой необходимость создания большого количества разнотипных брэгговских структур и фазовых масок для их записи. Вместе с тем, оптико-электронная схема многосенсорного зонда позволяет исключить использование ленточного МТР/МРО разъема, выполнив разделение и объединение оптических каналов внутри съемной части зонда.

Объединяющей характеристикой в пользу примененного решения является то, что оно позволяет определить положение всех а-ВБР в измерительной системе с разрешающей способностью, превышающей 2 пм и частотой съема информации более 1 кГц, что на порядки превышает требования, предъявляемые к измерительным системам подобного рода.

Использование 36 измерительных каналов влечет за собой необходимость использования 36 оптических волокон с необходимостью их разворота на удаленном конце. Таким образом, внутренняя часть катетера должна позволять уложить внутри 72 оптических волокна, а само оптическое волокно должно поддерживать сверхмалый радиус изгиба. Максимальный диаметр изгиба оптического волокна не должен превышать диаметр внутренней части зонда.

Внешний диаметр оптических волокон не превышает 250 мкм, что позволяет уложить даже при самой неплотной упаковке 16 волокон на каждом квадратном миллиметре, следовательно, для укладки 72 оптических волокон потребуется площадь, не превышающая 4 квадратных миллиметров

Стандартные оптические волокна, используемые в телекоммуникациях, предполагают максимальный диаметр изгиба равным 60 мм. Уменьшение радиуса изгиба влечет за собой потери света за счет выхода светового потока из сердцевины оптического волокна за оболочку.

Существуют и оптические волокна с высокой стойкостью к изгибам, такие волокна специально создаются для уменьшения стоимости и времени монтажа, повышения надежности сетей, а также позволяет их использовать в сложных условиях. Оптические волокна фирмы Corning «ClearCurve® LBL fiber» и «ClearCurve® ZBL fiber» предполагают максимальный диаметр изгиба 15 и 10 мм, соответственно с максимальными потерями при на одном полном обороте меньших, чем 0,4 и 0,1 дБ, соответственно, на длине волны 1550 нм, что соответствует оптическим потерям на 1 км оптического пути.

Использование специализированных оптических волокон позволяет решить задачу разворота оптических каналов внутри внутренней части зонда. Выбор компоновки расположения датчиков вдоль зонда и вдоль оптических каналов позволяет выполнять разворот оптических волокон в разных местах по длине зонда, как это схематично изображено на рис. 2. Равномерное распределение разворотов оптических волокон вдоль длины зонда позволяет исключить проблему с группировкой разворота большого количества оптических волокон в одном месте, что упрощает задачу сборки устройства.

Заключение

В статье предложено решение задачи многосенсорных манометрических измерений с высоким разрешением на примере мониторинга кишечника. Проведен анализ мультиплексирования спектрально-адресных ВБР на пропускание в один оптический информационный канал. Выполнена разработка радиофотонного измерительного преобразования для многосенсорных измерений.

Проведенная оценка погрешности измерений амплитудных параметров огибающей с учетом ее квазигармонического характера и а-ВБР позволила определить значение разрешающей способности измерений в ± 2 пм, что на порядок меньше чем требуемая величина для манометрии высокого разрешения, достижимая с помощью известных спектральных или векторных методов измерений.

Предложено решение задачи компоновки элементов оптико-электронной схемы во внутренней части зонда. Проведен подбор оптического волокна, удовлетворяющего требованиям плотной упаковки оптического волокна в условиях дефицита пространства.

Список литературы

1. Optical fibre pressure sensors in medical applications / S. Poeggel [et al.] // *Sensors*. 2015. Vol. 15. P. 17115–17148. DOI: <https://doi.org/10.3390/s150717115>.
2. Lekholm A., Lindström L. Optoelectronic transducer for intravascular measurements of pressure variations // *Med. Biol. Eng.* 1969. Vol. 7. P. 333–335.
3. Lindstrom L.H. Miniaturized pressure transducer intended for intravascular use // *IEEE Trans. Biomed. Eng.* 1970. Vol. BME-17. P. 207–219. DOI: <https://doi.org/10.1109/TBME.1970.4502735>.
4. The development of a fibre optic catheter tip pressure transducer / H. Matsumoto [et al.] // *J. Med. Eng. Technol.* 1978. Vol. 2. P. 239–242. DOI: <https://doi.org/10.3109/03091907809161807>.
5. Faria J.B. A theoretical analysis of the bifurcated fiber bundle displacement sensor // *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 1998. Vol. 47. № 3. P. 742–747. DOI: <https://doi.org/10.1109/19.744340>.
6. Brandao Faria J. Modeling the Y-branched optical fiber bundle displacement sensor using a quasi-Gaussian beam approach // *Microw. Opt. Technol. Lett.* 2000. Vol. 25. P. 138–141.
7. A new «transducer-tipped» fiber optic catheter for measuring intramuscular pressures / A.G. Crenshaw [et al.] // *J. Orthop. Res.* 1990. Vol. 8. P. 464–468. DOI: <https://doi.org/10.1002/jor.1100080318>.
8. Fiber optic intensity-modulated sensors: A review in biomechanics / P. Roriz [et al.] // *Photonic Sens.* 2012. Vol. 2. P. 315–330. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13320-012-0090-3>.
9. Амплитудно-фазовые методы формирования зондирующих излучений для систем анализа волоконно-оптических структур / О.Г. Морозов [и др.] // *Физика волновых процессов и радиотехнические системы*. 2007. Т. 10. № 3. С. 119–124.
10. Морозов О.Г. Амплитудно-фазовое преобразование частоты в системах временной и частотной рефлектометрии волоконно-оптических информационных и измерительных сетей // *Физика волновых процессов и радиотехнические системы*. 2004. Т. 7. № 1. С. 63–71.
11. Морозов О.Г., Айбатов Д.Л., Садеев Т.С. Синтез двухчастотного излучения и его применения в волоконно-оптических системах распределенных и мультиплексированных измерений // *Физика волновых процессов и радиотехнические системы*. 2010. Т. 13. № 3. С. 84–91.
12. Волоконно-оптические технологии в распределенных системах экологического мониторинга / В.Г. Куприянов [и др.] // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2011. Т. 13. № 4 (4). С. 1087–1091.
13. Структурная минимизация волоконно-оптических сенсорных сетей экологического мониторинга / В.В. Куревин [и др.] // *Инфокоммуникационные технологии*. 2009. Т. 7. № 3. С. 46–52.
14. Морозов О.Г., Степущенко О.А., Садыков И.Р. Модуляционные методы измерений в оптических биосенсорах рефрактометрического типа на основе волоконных решеток Брэгга с фазовым сдвигом // *Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы*. 2010. № 3. С. 3–13.
15. Волоконно-оптический рефрактометрический датчик / И.Р. Садыков [и др.] // *Труды МАИ*. 2012. № 61. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=35667>.
16. Optical refractometric FBG biosensors: problems of development and decision courses / O.A. Stepustchenko [et al.] // *Proc. SPIE*. 2011. Vol. 7992. P. 79920D. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.887282>.
17. Маломодовое зондирование датчиков на основе волоконных решеток Брэгга / В.Г. Куприянов [и др.] // *Научно-технический вестник Поволжья*. 2013. № 4. С. 200–204.
18. Волоконные решетки Брэгга с фазированной структурой в распределенных информационно-измерительных системах / С.Г. Алюшина [и др.] // *Нелинейный мир*. 2011. Т. 9/ № 8. С. 522–528.
19. Oliveira Silva S.F. de. *Fiber Bragg Grating Based Structures for Sensing and Filtering*. Porto: Porto University, 2007. 157 p.
20. Dong X. Bend measurement with chirp of fiber Bragg grating // *Smart Materials and Structures*. 2001. Vol. 10. № 5. P. 1111–1113. DOI: <https://doi.org/10.1088/0964-1726/10/5/404>.
21. Dong X. Optical pulse shaping based on a double-phase-shifted fiber Bragg grating // *Optoelectronics Letters*. 2015. Vol. 11. № 2. P. 100–102. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11801-015-5016-z>.
22. Морозов О.Г., Сахабутдинов А.Ж. Адресные волоконные брэгговские структуры в квазираспределенных радиофотонных сенсорных системах // *Компьютерная оптика*. 2019. Т. 43. № 4. С. 535–543. DOI: <https://doi.org/10.18287/2412-6179-2019-43-4-535-543>.
23. Радиофотонный дифференциальный акселерометр на двух адресных волоконных брэгговских решетках / А.Ж. Сахабутдинов [и др.] // *Фотон-экспресс*. 2019. № 5 (157). С. 7–15.
24. Fiber-optic acceleration sensor on duplex fiber bragg structures / A.Zh. Sakhabutdinov [et al.] // *Journal of Computational and Engineering Mathematics*. 2018. Vol. 5. № 4. P. 16–32. DOI: <https://doi.org/10.14529/jcem180402>.
25. Сахабутдинов А.Ж., Морозов О.Г. Процедура опроса сдвоенных адресных волоконных брэгговских структур как датчиков радиофотонной малосенсорной системы // *Физика волновых процессов и радиотехнические системы*. 2018. Т. 21. № 3. С. 101–109.
26. Радиофотонные двухчастотные способы интеррогации однотипных волоконных брэгговских решеток, объединенных в группу / О.Г. Морозов [и др.] // *Физика волновых процессов и радиотехнические системы*. 2017. Т. 20. № 2. С. 21–34.
27. Волоконные брэгговские решетки с двумя фазовыми сдвигами как чувствительный элемент и инструмент мультиплексирования сенсорных сетей / Р.Ш. Мисбахов [и др.] // *Инженерный вестник Дона*. 2017. № 3 (46). URL: <http://ivdon.ru/rumagazine/archive/N3y2017/4343>.
28. Optical vector network analyzer based on amplitude-phase modulation / V.V. Purtov [et al.] // *Proc. SPIE*. 2016. Vol. 9807. P. 980717. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2232993>.

29. Microwave photonic polyharmonic probing for fiber optical telecommunication structures and measuring systems sensors monitoring / V.V. PurtoV [et al.] // Proc. IEEE. 2017. Vol. 10774. P. 107741J. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2318738>.
30. Радиофотонное полигармоническое зондирование широкополосных волоконно-оптических структур в телекоммуникационных системах / В.В. Пуртов [и др.] // Нелинейный мир. 2017. Т. 15. № 6. С. 40–48.
31. Оценка возможностей применения волоконных решеток Брэгга с гауссовым профилем отражения в качестве датчика температуры / О.Г. Морозов [и др.] // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2013. № 2 (18). С. 73–79.
32. Пуртов В.В., Аглиуллин Т.А., Аглиуллин А.Ф. Роль тренажера в обучении эндоскопической хирургии // Поволжский онкологический вестник. 2016. № 2. С. 101–103.

References

1. Poeggel S. et al. Optical fibre pressure sensors in medical applications. *Sensors*, 2015, vol. 15, pp. 17115–17148. DOI: <https://doi.org/10.3390/s150717115>.
2. Lekholm A., Lindström L. Optoelectronic transducer for intravascular measurements of pressure variations. *Med. Biol. Eng.*, 1969, vol. 7, pp. 333–335.
3. Lindström L.H. Miniaturized pressure transducer intended for intravascular use. *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, 1970, vol. BME-17, pp. 207–219. DOI: <https://doi.org/10.1109/TBME.1970.4502735>.
4. Matsumoto H. et al. The development of a fibre optic catheter tip pressure transducer. *J. Med. Eng. Technol.*, 1978, vol. 2, pp. 239–242. DOI: <https://doi.org/10.3109/03091907809161807>.
5. Faria J.B. A theoretical analysis of the bifurcated fiber bundle displacement sensor. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 1998, vol. 47, no. 3, pp. 742–747. DOI: <https://doi.org/10.1109/19.744340>.
6. Brandao Faria J. Modeling the Y-branched optical fiber bundle displacement sensor using a quasi-Gaussian beam approach. *Microw. Opt. Technol. Lett.*, 2000, vol. 25, pp. 138–141.
7. Crenshaw A.G. et al. A new «transducer-tipped» fiber optic catheter for measuring intramuscular pressures. *J. Orthop. Res.*, 1990, vol. 8, pp. 464–468. DOI: <https://doi.org/10.1002/jor.1100080318>.
8. Roriz P. et al. Fiber optic intensity-modulated sensors: A review in biomechanics. *Photonic Sens.*, 2012, vol. 2, pp. 315–330. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13320-012-0090-3>.
9. Morozov O.G. et al. Amplitudno-fazovye metody formirovaniya zondirujushchih izlucheniij dlja sistem analiza volokonno-opticheskikh struktur. *Fizika volnovyh protsessov i radiotekhnicheskie sistemy*, 2007, vol. 10, no. 3, pp. 119–124. [In Russian].
10. Morozov O.G. Amplitude and phase frequency conversion in systems time and frequency domain reflectometry optical fiber and measuring information networks. *Fizika volnovyh protsessov i radiotekhnicheskie sistemy*, 2004, vol. 7, no. 1, pp. 63–71. [In Russian].
11. Morozov O.G., Ajbatov D.L., Sadeev T.S. Synthesis of the dual-frequency radiation and its use in fiber optic systems, distributed and multiplexed measurements. *Fizika volnovyh protsessov i radiotekhnicheskie sistemy*, 2010, vol. 13, no. 3, pp. 84–91. [In Russian].
12. Kuprijanov V.G. et al. Fiber-optic technology in distributed environmental monitoring systems. *Izvestija Samarskogo nauchnogo tsentra Rossijskoj akademii nauk*, 2011, vol. 13, no. 4 (4), pp. 1087–1091. [In Russian].
13. Kurevin V.V. et al. Structural minimization volokonno-optical sensor for environmental monitoring networks. *Infokommunikatsionnye tehnologii*, 2009, vol. 7, no. 3, pp. 46–52. [In Russian].
14. Morozov O.G., Stepuschenko O.A., Sadykov I.R. Modulyatsionnye measurement techniques in optical biosensors refractometric type based on fiber Bragg gratings with a phase shift. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tehnologicheskogo universiteta. Serija: Radiotekhnicheskie i infokommunikatsionnye sistemy*, 2010, no. 3, pp. 3–13. [In Russian].
15. Sadykov I.R. et al. Fiber-optic sensor refractometric. *Trudy MAI*, 2012, no. 61, URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=35667>. [In Russian].
16. Stepustchenko O.A. et al. Optical refractometric FBG biosensors: problems of development and decision courses. *Proc. SPIE*, 2011, vol. 7992, p. 79920D. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.887282>.
17. Kuprijanov V.G. et al. Low-mode sensing sensors based on fiber Bragg gratings. *Nauchno-tehnicheskij vestnik Povolzh'ja*, 2013, no. 4, pp. 200–204. [In Russian].
18. Aljushina S.G. et al. Fiber Bragg grating structure in a phased distributed information-measuring systems. *Nelinejnyj mir*, 2011, vol. 9, no. 8, pp. 522–528. [In Russian].
19. Oliveira Silva S.F. de. *Fiber Bragg Grating Based Structures for Sensing and Filtering*. Porto: Porto University, 2007, 157 p.
20. Dong X. Bend measurement with chirp of fiber Bragg grating. *Smart Materials and Structures*, 2001, vol. 10, no. 5, pp. 1111–1113. DOI: <https://doi.org/10.1088/0964-1726/10/5/404>.
21. Dong X. Optical pulse shaping based on a double-phase-shifted fiber Bragg grating. *Optoelectronics Letters*, 2015, vol. 11, no. 2, pp. 100–102. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11801-015-5016-z>.
22. Morozov O.G., Sahabutdinov A.Zh. Addressable fiber Bragg structure in the quasi-distributed sensor systems radiophotons. *Komp'juternaja optika*, 2019, vol. 43, no. 4, pp. 535–543. DOI: <https://doi.org/10.18287/2412-6179-2019-43-4-535-543>. [In Russian].
23. Sahabutdinov A.Zh. et al. Radiophotons differential accelerometer on two targeted fiber Bragg gratings. *Foton-ekspress*, 2019, no. 5 (157), pp. 7–15. [In Russian].
24. Sakhabutdinov A.Zh. et al. Fiber-optic acceleration sensor on duplex fiber bragg structures. *Journal of Computational and Engineering Mathematics*, 2018, vol. 5, no. 4, pp. 16–32. DOI: <https://doi.org/10.14529/jcem180402>.

25. Sahabutdinov A.Zh., Morozov O.G. polling procedure addressable dual fiber Bragg structures both sensors radiophotons system malosensornoy. *Fizika volnovykh protsessov i radiotekhnicheskie sistemy*, 2018, vol. 21, no. 3, pp. 101–109. [In Russian].
26. Morozov O.G. et al. Radiophotons two-frequency methods interrogatsii same type of fiber Bragg gratings, within the group. *Fizika volnovykh protsessov i radiotekhnicheskie sistemy*, 2017, vol. 20, no. 2, pp. 21–34. [In Russian].
27. Misbahov R.Sh. et al. Fiber Bragg grating with two phase shifts of both sensor and sensor networks multiplexing tool. *Inzhenernyj vestnik Dona*, 2017, no. 3 (46), URL: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/N3y2017/4343>. [In Russian].
28. Purto V.V. et al. Optical vector network analyzer based on amplitude-phase modulation. *Proc. SPIE*, 2016, vol. 9807, p. 980717. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2232993>.
29. Purto V.V. et al. Microwave photonic polyharmonic probing for fiber optical telecommunication structures and measuring systems sensors monitoring. *Proc. IEEE*, 2017, vol. 10774, p. 107741J. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2318738>.
30. Purto V.V. et al. Radiophotons polyharmonic sensing broadband fiber-optic structures in telecommunication systems. *Nelinejnyj mir*, 2017, vol. 15, no. 6, pp. 40–48. [In Russian].
31. Morozov O.G. et al. Evaluation of application possibilities of fiber Bragg gratings with reflection Gaussian profile as a temperature sensor. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tehnologicheskogo universiteta. Serija: Radiotekhnicheskie i infokommunikatsionnye sistemy*, 2013, no. 2 (18), pp. 73–79. [In Russian].
32. Purto V.V., Agliullin T.A., Agliullin A.F. The role of the trainer in the training of endoscopic surgery. *Povolzhskij onkologicheskij vestnik*, 2016, no. 2, pp. 101–103. [In Russian].

UDC 621.383

DOI 10.18469/1810-3189.2019.22.4.163-174

Received: 08.10.2019

Accepted: 06.11.2019

Multi-sensory microwave photonic address measuring system for intestinal manometry

A.F. Agliullin¹, V.V. Purto², A.Zh. Sakhabutdinov³,
I.I. Nureev³, A.A. Tyazhelova³, L.M. Sarvarova³, S.V. Vasiliev⁴,
I.U. Kurbiev⁵, A.D. Proskuryakov⁵, V.V. Kadushkin⁵

¹ LLC «Research and Production Firm MFS»

163A, Adel Kutuya Street

Kazan, 420087, Russian Federation

² LLC «Infocom-SPb»

27, bld. 40, letter BU, Engels Prospect

St. Petersburg, 194156, Russian Federation

³ Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev - KAI

10, K. Marx Street

Kazan, 420111, Russian Federation

⁴ JSC «Scientific and Production Concern «Engineering Technologies»

58, bld. 4, Leningradskoye Shosse

Moscow, 125212, Russian Federation

⁵ LLC «NPK Sensorika»

42, bld. 1, Bolshoy Boulevard

Moscow, 121205, Russian Federation

Solutions for a multi-sensor catheter in high resolution manometry based on classical interrogation with wave separation of fiber optic sensors or their polyharmonic probing already exist. Measuring systems based on interrogating arrays of the same type of Bragg gratings by the method of interference with a frequency shift and spatial separation of obtaining information from each grating separately, although their spatial resolution is slightly lower than required, are proposed. The indicated type of solutions requires expensive tunable lasers or narrow-band filters, and frequency-shifted interference, including two-frequency, with a microwave photonic interrogation method, entails the construction of an extremely complex interferometric optoelectronic circuit with the need to ensure its stable operation. Supplementing the task with the requirement to simplify and reduce the cost of the system as much as possible by means of microwave photonic sensing methods and using an array of structured gratings or gratings with phase shift in the system, and, finally, addressable fiber Bragg gratings, which we are actively developing, we will get a complete statement of the problem of constructing a multi-sensor catheter for intestinal manometry. The results of these task solutions are presented in this article.

Keywords: intestinal pressure, catheter, fiber Bragg grating with two phase shifts, multi-sensor measurement system, radiophoton interrogation of sensors.

Аглиуллин Артур Факилевич, кандидат технических наук, доцент, генеральный директор ООО ««Научно-производственная фирма МФС» (г. Казань). Автор более 50 научных работ, 4 монографий.

Область научных интересов: оптомеханика оптических волокон и волоконно-оптических устройств, волоконная сенсорика, инструмент для применения в медицине.

E-mail: mfsmed@mail.ru

Пуртов Вадим Владимирович, генеральный директор ООО «Инфоком-СПб» (г. Санкт-Петербург). Автор более 20 научных работ.

Область научных интересов: оптомеханика оптических волокон и волоконно-оптических устройств, волоконная сенсорика, инструмент для применения в медицине.

E-mail: purvad@mail.ru

Сахабутдинов Айрат Жавдатович, доктор технических наук, профессор кафедры радиотоники и микроволновых технологий Казанского национального исследовательского технического университета имени А.Н. Туполева - КАИ. Автор более 100 научных работ, 1 монографии.

Область научных интересов: математическое моделирование процессов распространения лазерного излучения в различных средах, решение задач математической физики, волоконная сенсорика, радиотоника.

E-mail: kazanboy@yandex.ru

Нуреев Ильнур Ильдарович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры радиотоники и микроволновых технологий Казанского национального исследовательского технического университета имени А.Н. Туполева - КАИ. Автор более 100 научных работ, 1 монографии.

Область научных интересов: оптомеханика оптических волокон и волоконно-оптических устройств, волоконная сенсорика, многочастотные зондирующие системы и комб-генераторы оптического диапазона, радиотоника.

E-mail: n2i2@mail.ru

Тяжелова Алина Александровна, магистр кафедры радиотоники и микроволновых технологий Казанского национального исследовательского технического университета имени А.Н. Туполева - КАИ. Автор 5 научных работ.

Область научных интересов: методы и средства управления параметрами лазерного излучения в медицинских приборах.

E-mail: lina.tyazhelova@mail.ru

Сарварова Люция Марьяковна, старший преподаватель кафедры радиотоники и микроволновых технологий Ка-

занского национального исследовательского технического университета имени А.Н. Туполева - КАИ. Автор 15 научных работ.

Область научных интересов: методы и средства управления параметрами лазерного излучения в медицинских приборах.

E-mail: sarvarova.54@mail.ru

Васильев Сергей Валентинович, доктор технических наук, начальник департамента НИР и ОКР АО «НПО «Технологии машиностроения» (г. Москва). Автор 75 научных работ.

Область научных интересов: конверсионные разработки в различных областях науки и техники.

E-mail: info@tecmash.ru

Курбиев Илдус Ульфатович, кандидат экономических наук, коммерческий директор ООО «НПК «Сенсорика» (г. Москва). Автор 10 научных работ.

Область научных интересов: волоконно-оптическая сенсорика.

E-mail: kurbiev@yandex.ru

Проскураков Андрей Дмитриевич, ведущий инженер ООО «НПК «Сенсорика» (г. Москва). Автор 5 научных работ.

Область научных интересов: волоконно-оптическая сенсорика.

E-mail: aproskur@yandex.ru

Кадушкин Владислав Валерьевич, научный сотрудник ООО «НПК «Сенсорика» (г. Москва). Автор 25 научных работ.

Область научных интересов: волоконно-оптическая сенсорика.

E-mail: vladislav.kadushkin@gmail.com