

## Иерархический классификатор задач построения радиофотонных сенсорных систем на основе адресных волоконных брэгговских структур

*А.Ж. Сахабутдинов*

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

**Аннотация:** Радиофотонные сенсорные системы представляют собой широкий класс систем преобразования измерительной информации, в которых используются унифицированные на сегодняшний день оптические аналоговые звенья параллельного и последовательного типа с фильтрацией, позволяющие функционально отобразить информацию, полученную в оптическом диапазоне, в радиочастотном. Одним из основных, наиболее широко применяемых элементов в РФСС, решающим задачи формирования, фильтрации и измерительного преобразования оптического излучения, в том числе для стадии дальнейшей генерации радиочастотных несущих, является волоконная брэгговская решетка. Совокупный анализ позволил предложить для построения РФСС новый класс сенсоров – адресных волоконных брэгговских структур (АВБС), построенных на основе ВБР с двумя симметричными дискретными фазовыми сдвигами или двух идентичных ВБР, потенциально обладающих улучшенными метрологическими и технико-экономическими характеристиками, а также, расширенными функциональными возможностями по сравнению с существующими, широко используемыми резонансными сенсорами, на основе эффектов Брэгга и Фабри-Перо в волоконной оптике. АВБС по своему назначению должны стать многофункциональным элементом РФСС, выполняющими роль сенсоров, формирователей двухчастотного оптического излучения, основой для генерации в каждой из них уникальной разностной радиочастоты, несущей измерительную информацию, которая, кроме того, является адресом для их мультиплексирования. Это позволило предложить новый, отдельный класс РФСС, который был назван «Радиофотонные сенсорные системы на адресных волоконных брэгговских структурах», иерархический классификатор задач создания которых и явился основным предметом данной статьи.

**Ключевые слова:** радиофотонная сенсорная система, адресная волоконная брэгговская структура, комплексированный волоконно-оптический датчик, интеррогация, мультиплексирование, иерархический классификатор задач построения, системный подход.

### Введение

Известно, что ввиду своей высокой спектральной селективности волоконные брэгговские решетки (ВБР) эффективно объединять в массивы по принципу спектрального уплотнения, где для каждого датчика определен некий рабочий спектральный диапазон, определяемый диапазоном измерений

---

физической величины и характеристиками профиля самой ВБР. На таком принципе построено большинство современных волоконно-оптических многосенсорных систем, где в качестве устройства опроса используются оптико-электронные интеррогаторы. Рабочий спектральный диапазон таких приборов обычно лежит в пределах 1510...1590 нм, что позволяет объединить в массив до 40 датчиков.

Недостатком такой концепции является необходимость использования широкополосных источников оптического излучения для зондирования датчиков и узкополосных оптических фильтров с широким диапазоном перестройки для их опроса. Последние в значительной мере увеличивают стоимость устройства интеррогации и ограничивают скорость опроса до 100 Гц (при обеспечении требуемого спектрального разрешения) [1-3].

Увеличение числа подключенных датчиков возможно при объединении однотипных (с одинаковой исходной центральной длиной волны) ВБР в группу. В этом случае спектры опрашиваемых ВБР могут перекрываться, что еще больше усложнит задачу интеррогации. Для опроса таких систем датчиков используются интерферометрические методы с высокочувствительной аппаратурой, также не менее дорогой чем при волновом мультиплексировании [4-5].

В связи с этим остро стоит проблема поиска более эффективного метода различения ВБР в массиве сенсорной системы. В настоящее время существует несколько таких решений: радиотонное с полигармоническим зондированием (РПЗ) ВБР с дискретным фазовым сдвигом [4, 6], оптическое кодовое с радиотонным опросом и корреляцией с формированием в ВБР кода фазовых сдвигов на основе дискретных вытянутых сфероидальных функций (ДВСФ) Слепяна [7], и предложенных нами адресных волоконных брэгговских структур (АВБС) на ВБР с двумя симметричными дискретными фазовыми  $\pi$ -сдвигами [8] или двух идентичных сверх узкополосных ВБР.

---

Целью работы является сравнительный анализ указанных выше решений, определение преимуществ концепции АВБС по сравнению с РПЗ и ДВСФ, и разработка иерархического классификатора для построения нового класса радиофотонных сенсорных систем (РФСС) на основе АВБС.

### Сравнительный анализ концепций построения адресных ВБР

Основные результаты сравнительного анализа представлены нами в таблице №1.

Таблица №1

#### Сравнительные характеристики концепции различения ВБР в массиве

Функция	ВБР с дискретным фазовым сдвигом	ВБР с оптическим кодированием	Адресная ВБС
Формирование зондирующего излучения	Электрооптический модулятор и перестраиваемый лазер	Электрооптический модулятор и перестраиваемый лазер	ВБР с двумя фазовыми сдвигами или две идентичные сверх узкополосные ВБР
Измерительное преобразование	Длина волны-время/амплитуда/фаза на множестве длин волн ВБР	Корреляция кода решетки и зондирующей посылки (одна длина волны)	Длина волны-амплитуда в диапазоне измерений ВБС (одна длина волны)
Мульти-плексирование	Нет адреса Спектры ВБР не могут перекрываться. Необходимы специальные интерферометрические решения	Адрес как сложный код Слепяна Спектры ВБР могут перекрываться	Адрес как, разностная частота между окнами прозрачности или двумя идентичными ВБР. Спектры ВБР перекрываются
Интеррогация	Фильтрация, полигармоническое зондирование, оптико-электронный автогенератор, двухчастотный лазер	Полигармоническое зондированием и амплитудно-фазовый коррелятор со сложной синхронизацией	Оптический фильтр с наклонным склоном перед фотоприемником; электронный фильтр по адресным частотам после фотоприемника

Реализация РПЗ основана на формировании спектрального и частотно-однозначного отображения сдвига длины волны по положению корреляционного пика ЛЧМ-радиосигнала [6]. Данная методика широко используется в современных радиолокационных системах для увеличения разрешающей способности измерений.

Скорость определения центральной длины волны соответствует единицам мегагерц. Если используется волокно с высоким коэффициентом двулучепреломления, то по различным поляризационным составляющим может быть измерена как деформация, так и температура. С позиций полигармонических РФСС [3, 5] можно использовать комбгенератор, построенный на электрооптических модуляторах, для синтеза множества известных двухчастотных зондирующих излучений с различными разностными частотами для каждого положения ВБР с дискретным фазовым сдвигом. Ряд работ авторов [6], описывающих аналогичные датчики, оперируют только одной решеткой. Вопросы построения малосенсорных или многосенсорных систем рассматриваются только в [1-5].

Другой подход к интеррогации в сенсорных сетях заключается в использовании мультиплексирования с оптическим кодовым разделением (OCDM) [7], при использовании которого массив датчиков зондируют псевдослучайной двоичной последовательностью (PRBS) для корреляции отраженного сигнала от каждого датчика с мгновенным кодом, отправленным в сеть. В этом методе используются супер структурированные ВБР, с записанным, в каждой из них, оптическим кодом, предназначенным для дешифровки (идентификации) и получения ортогональности относительно своих соседних датчиков в сети. В этом случае ортогональность кодов между смежными датчиками позволяют им перекрываться в одном и том же рабочем диапазоне, тем самым увеличивая использование полосы в сети.

---

Один из простых способов достижения оптических структур с взаимной ортогональностью между ними заключается в использовании дискретных вытянутых сфероидальных функций (ДВСФ) Слепяна [7]. Они предложены несколько десятилетий назад, но обладают интересными свойствами, которые открываются и исследуются даже в наши дни. Каждая последовательность ДВСФ имеет определенную структуру амплитуды и фазы, что дает возможность различать их друг от друга.

Несмотря на преимущества, данный метод очень сложен в реализации. Интеррогатор должен иметь возможность восстанавливать обе величины (амплитуду и фазу) частотной характеристики. Поэтому, требуется специальная синхронизация между источником и обработчиком отраженного сигналом, что в конечном итоге можно понимать, как частный случай мультиплексирования во временной области со своими недостатками по скорости опроса датчиков, погрешностям измерений и сложности реализации.

При использовании АВБС для сенсорных систем [8], построенных на основе пассивных оптических телекоммуникационных сетей, число мультиплексируемых датчиков может достигать 256 единиц. При этом, все датчики могут иметь одинаковую центральную длину волны, и могут быть объединены в древовидную, шинную и другие топологии. При этом разность частот биений между каждым из датчиков должна составлять 4 МГц, что не создаст проблем при их различении с помощью быстрого преобразования Фурье.

Таким образом, в случае интеррогации АВБС сами адресные волоконные брэгговские структуры на основе ВБР с двумя дискретными фазовыми сдвигами или на основе двух идентичных сверх узкополосных ВБР используются как формирователь зондирующего излучения, мультиплексор, чувствительный элемент, а их интеррогация осуществляется с помощью

---

оптического фильтра до фотоприемника, фотоприемника и электронного фильтра по адресным частотам после фотоприемника. Сложнейшая спектральная оптическая и электрооптическая модуляционная аппаратура исключается.

Проведенные оценки позволяют перейти к формированию концепции РФСС на основе АВБС.

### **Концепция радиифотонных сенсорных систем на основе адресных волоконных брэгговских структур**

Отмеченные выше обстоятельства определяют актуальность научно-технической проблемы улучшения метрологических и технико-экономических характеристик, а также расширения функциональных возможностей РФСС, построенных с использованием комплексированных волоконно-оптических датчиков (КВОД) на основе волоконных брэгговских структур.

Совокупный анализ характеристик РФСС, используемых в них КВОД, методов мультиплексирования и регистрации данных для волоконно-оптических датчиков последних, а также разновидностей зондирующих сигналов и методов их измерительного преобразования позволил предложить новый класс РФСС, обладающий улучшенными метрологическими и технико-экономическими характеристиками, а также расширенными функциональными возможностями по сравнению с существующими измерительными системами.

Данный класс назван «Радиофотонные сенсорные системы на основе адресных волоконных брэгговских структур».

Приведенные аргументы и требования к построению современных РФСС однозначно указывают на необходимость рассмотрения возможности

их создания на основе адресных подходов. РФСС на основе АВБС должны базироваться на разработке и развитии:

- теории и техники АВБС;
- концепции единого поля КВОД на основе АВБС для одно-, мало- и многосенсорных приложений, основой практической реализации которых, особенно в многосенсорных приложениях, является вопрос мультиплексирования и обработки адресной информации, не только в условиях флуктуаций и шумов, но и при наличии ложных адресов;
- измерительных подходов для опроса как точечных, так и квази-распределенных адресных КВОД и принципов построения сенсорных сетей, особенно в условиях получения с одной АВБС измерительной информации о нескольких физических полях одновременно.

Рассмотрим множество задач анализа и синтеза, которые предстоит решить при разработке теории и техники РФСС на основе АВБС.

Общая абстрактная модель функционирования сложной системы при задании ее входов и выходов в теории систем рассматривается, как отношение декартова произведения серии множеств  $S \subseteq X \times Y$ , где множество входов  $X = X_1 \times X_2 \times \dots \times X_n$  состоит из подмножеств  $X_i$ ;  $Y$  – множество выходов системы. Если  $S$  – функция, то РФСС на основе АВБС – функциональная система, представляющая собой отображение абстрактного множества  $X$  в абстрактное множество  $Y$ , т.е.  $S : X \rightarrow Y$ , которое каждому элементу  $x \in X$  ставит в соответствие единственный элемент из  $Y$ .

Обоснование моделей РФСС на основе АВБС, соответствующих различным уровням описания, и выбор исходных множеств, определяемых приведенным выше соотношением, необходимо проводить на основе задач, решаемых системой, с учетом характерных свойств АВБС, методов их освещения и методов обработки отраженных или пропущенных решетками излучений в условиях флуктуаций и шумов. Наиболее отвечающей

---

современным представлениям является модель РФСС на основе АВБС в виде пространственно-временного фильтра, позволяющего контролировать параметры физических полей, которые содержатся в амплитудных, частотных, фазовых и поляризационных параметрах оптического информационного поля, распространяющегося в волокне после взаимодействия с решеткой.

Очевидно, что полная абстрактная модель РФСС на основе АВБС сложна, поэтому использование ее даже для анализа сопряжено с серьезными трудностями. Поэтому решение задач анализа и синтеза структуры РФСС на основе АВБС и выбора целесообразных стратегий их применений должно производиться с позиций системного подхода. Основой системного подхода служит описание рассматриваемой системы на различных уровнях абстракции, чтобы наиболее простое описание отражало основные аспекты поведения системы. Для синтеза пространственно-временной структуры РФСС на основе АВБС целесообразно задавать общую и частную модели их функционирования. Общая модель должна включать частные модели, характеризующие основные процессы функционирования РФСС на основе АВБС.

В качестве базиса измерительных систем РФСС на основе АВБС, выберем устоявшиеся представления к унифицированному фильтрационному радиофотонному звену параллельного (рис.1) [9] и последовательного (рис.2) типов, предложенного в работах научной школы КНИТУ-КАИ [1-5], а также обобщенному процессору радиофотонной обработки сигналов (рис.3), предложенному в [10]. На основе последнего разработаем процессор, который наиболее точно удовлетворяют условиям построения РФСС на основе АВБС. На рис.4 представлена его структурная схема. Из рисунка видно, что блоки ПФИОИ, ЭОМ и ПОФ заменены единой АВБС, которая одна выполняет их функции.

---



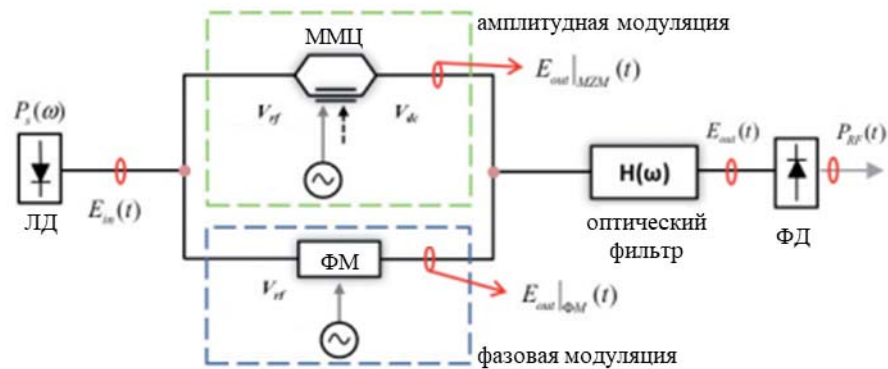


Рис. 1. – Функциональная схема радиофотонного звена с фильтрацией параллельного типа: ЛД – лазерный диод, ММЦ – амплитудный модулятор, ФМ – фазовый модулятор, ФД – фотодиод

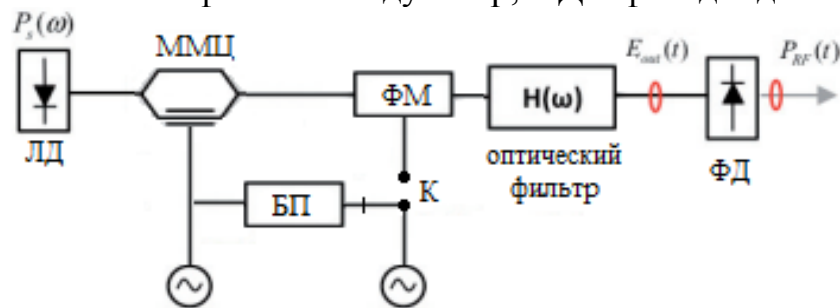


Рис. 2. – Функциональная схема радиофотонного звена с фильтрацией последовательного типа: БП – блок преобразования, К – устройство коммутации

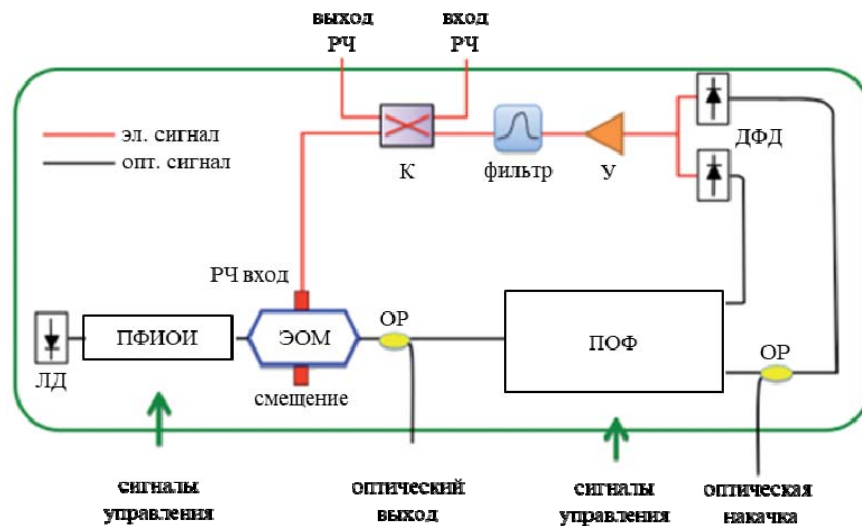


Рис. 3. – Обобщенный процессор радиофотонной информационной обработки сигналов: ПФИОИ – перестраиваемый фильтр источника оптического излучения, ЭОМ – электрооптический модулятор, ОР – оптический разветвитель, ПОФ – перестраиваемый оптический фильтр, ДФД – дифференциальный фотодетектор, У – усилитель радиочастоты (РЧ)

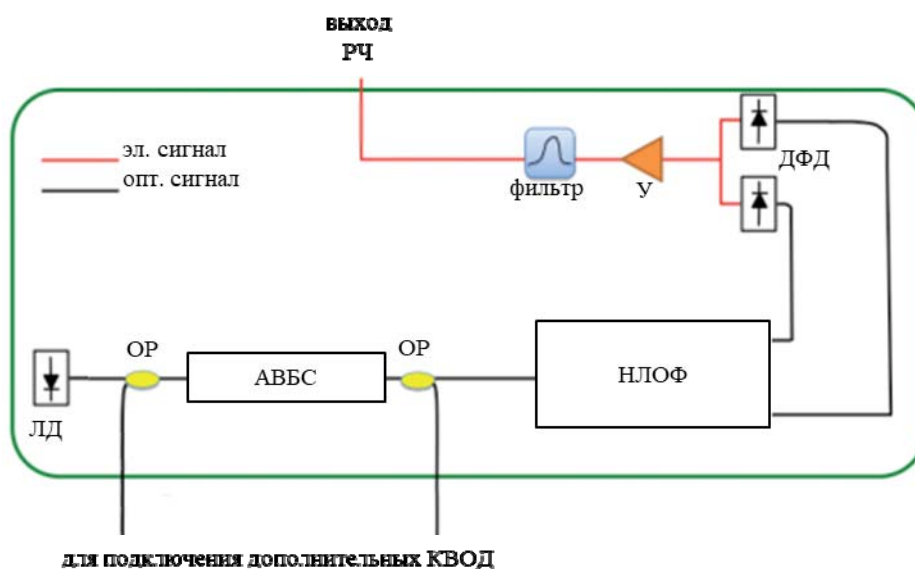


Рис. 4. – Обобщенный процессор радиофотонной сенсорной обработки сигналов: НЛОФ – наклонный линейный оптический фильтр

ОР оставлены для демонстрации возможности подключения дополнительного множества адресных КВОД в произвольной последовательной, параллельной, комбинированной топологии. Оставлено два вида ФД для приема, как с опорным каналом, так и отдельно для каждого датчика (ДФД). Дополнительно между датчиками и ДФД поставлен оптический фильтр с наклонной линейной характеристикой для разделения информации для каждого канала измерений. Для классических схем измерений он аналогичен сканирующим фильтрам Фабри-Перо, дифракционной решетке, ПЗС-матрице и т.д.

Приведенные выше примеры указывают на возможность использования объединенной концепции построения РФСС на основе представлений о радиофотонных фильтрационных звеньях и процессорах.

Предлагаемая архитектура РФСС на основе АВБС охватывает все разнообразие приложений в области сенсорных систем (общая задача) и каждой конкретной решаемой задачи (частные задачи), как показано в таблице №2.

Таблица №2

Задачи, решаемые с помощью универсального процессора РФСС

Разновидности РФСС		Элементы процессора									
Вид	Тип РЧ сигнала	ЛД	ПФИОИ	ЭОМ	ОР	ПОФ	ОС	ФД	У	Ф	К
ФФРС	аналоговый	ЛД, ПЛД, ШЛД	+	АМ, ФМ	–	КИХ, БИХ, ДЛЗ	–	ФД, ДФД	±	±	×
ОЭАГ	аналоговый	ЛД	–	АМ, ФМ	±	БИХ/ДЛЗ	±	ФД	±	ПФ	=
ПЗ	аналоговый	ЛД	–	АМ, ФМ, ПолМ	+	БИХ	+	ДФД	±	+	×
АВБС	аналоговый	<ШЛД	–	–	+	БИХ+НОФ	+	ФД, ДФД	±	ИФ	–

**Примечание:** ФФРС – фотонный фильтр радиочастотного сигнала, ОЭАГ – оптико-электронный автогенератор, ПЗ – полигармоническое зондирование, ЛД – лазерный диод, ПЛД – перестраиваемый лазерный диод, ШЛД – широкополосный лазерный диод, АМ – амплитудная модуляция, ФМ – фазовая модуляция, ПолМ – поляризационная модуляция, КИХ – конечная импульсная характеристика, БИХ – бесконечная импульсная характеристика, ДЛЗ – дискретная линия задержки, ФД – фотодиод, ДФД – дифференциальный фотодиод, НФ – наклонный оптический фильтр, ПФ – полосовой фильтр радиосигнала, ИФ – избирательный фильтр радиосигнала, «×» – электрический коммутатор в перекрестном положении, «=» – электрический коммутатор в отдельной цепи, «+» – элемент используется, «–» – элемент не используется

### Иерархический классификатор задач синтеза РФСС на АВБС

Показатели эффективности соответствующих параметров, такие как скорость регистрации данных, потери, разрешение и другие показатели очень зависят от конкретных приложений. При использовании АВБС достаточно иметь ШЛД, работающий в диапазоне измерений, исключаются электрооптические модуляторы, а мультиплексирование КВОД и обработка информации осуществляется на адресных частотах в радиодиапазоне.

Учитывая последнее, определяющим фактором для синтеза структуры РФСС на основе АВБС, с учетом отказа от сложных источников зондирующего излучения и спектральных методов определения центральной длины волны ВБР, является множество параметров формируемого единого поля адресных КВОД. Анализ современного состояния теории и техники формирования единого поля безадресных КВОД [1-5], определения их отклика, количества и топологии, вариантов мультиплексирования позволяет представить проблемную область формирования единого поля адресных КВОД на основе АВБС в виде многоуровневого иерархического классификатора (рис.5).

*Первый* (верхний) *уровень* классификатора отображает АВБС с заданными (входные данные) амплитудными, частотными, фазовыми, поляризационными и пространственными характеристиками, как самой решетки, так и формирующих адрес фазовых сдвигов и соответствующих им окон прозрачности. Что позволяет реализовать  $N$ -адресное единое поле КВОД, которое используются в различных приложениях РФСС. Количество необходимых датчиков  $N$  отражено на *втором уровне* классификатора.

*Третий уровень* классификатора соответствует двум основным направлениям регистрации засвечивающего широкополосного лазерного излучения в его взаимодействии с АВБС: рефлектометрическому (работа на отражение) и прошедшему через решетку (работа на пропускание).

*Четвертый, пятый и шестой уровни* классификатора отображают частные задачи, для которых характерны различные топологии их включения, пространственное расположение, поляризационные особенности, как излучения, так и АВБС, например, одно-, мало- и много сенсорное единое поле с последовательно, параллельно или комбинированно соединенными КВОД, расположенные в одной или разнесенных зонах измерения, с решетками, записанными как в обычных одномодовых, так и

---

поляризационно-чувствительных волокнах или волокнах, сохраняющих поляризацию и т.д.

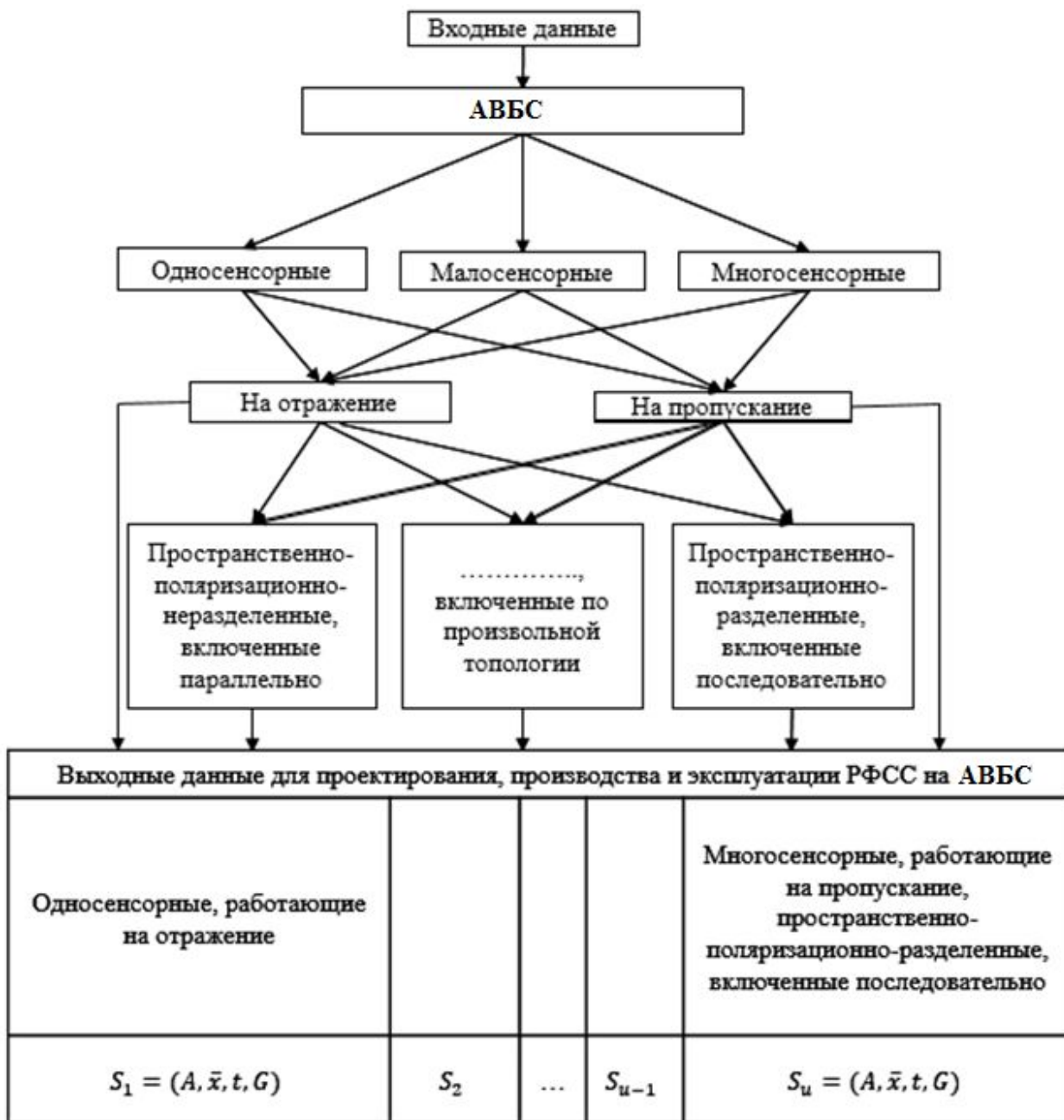


Рис.5. – Многоуровневый иерархический классификатор проблемной области проектирования, производства и эксплуатации РФСС на основе АВБС

Нижний уровень содержит изолированные, самостоятельные задачи, решаемые в процессе проектирования, производства и эксплуатации РФСС на основе АВБС в различных приложениях  $i = 1, n$ .

Приведенный многоуровневый иерархический классификатор отображает проблемную область как совокупность теоретических и прикладных знаний в области формирования единого поля РФСС на основе АВБС, накопленных на данный момент времени.

Решение общей задачи развития РФСС на основе АВБС может быть реализовано по уровням приведенного иерархического классификатора с соответствующими им критериями оценки эффективности и оптимизации формирования параметров АВБС с анализом вопросов методологии и практической разработки при работе на отражение и пропускание.

Для уровней классификатора со второго по пятый характерно определение оптимальных параметров АВБС по результатам математического моделирования и экспериментов на стадии создания макетов РФСС. На данной стадии могут быть определены разностная частота и амплитуда адресных составляющих, амплитудно-частотные характеристики самих ВБР, в которых формируется адрес, топологии и пространственно-поляризационные параметры их размещения, параметры калибровки по аналогии с полигармоническими системами [11-15].

Данные вопросы должны быть рассмотрены в аспектах развития единого поля адресных КВОД для одно-, мало- и многосенсорных приложений. При этом на более низких уровнях могут быть определены факторы, позволяющие определять требования к структурам, формирующим адрес при их возможных перекрытиях или воздействиях физических полей, которые приводят к синтезу ложных адресов, или двойников, хотя они должны быть рассмотрены на более высоких уровнях классификатора.

---

В этом случае встает вопрос о решении сложных систем уравнений, применении специальных оптических фильтров для частотного разделения адресов ВБР, создании эффективной системы последетекторной фильтрации в ходе определения измеряемых параметров индивидуально в каждом конкретном приложении. Эти задачи должны быть решены на примерах задач оборонного и топливно-энергетического комплекса [16], транспортных приложений, медицины [17-20], где также рассматриваются вопросы как одно- и мало-, так и многосенсорных приложений.

И, наконец, для верхнего уровня характерным является улучшение метрологических и технико-экономических характеристик и расширения функциональных возможностей РФСС на основе АВБС в целом. АВБС и методы обработки измерительной информации с наилучшими свойствами должны соответствовать экстремальным значениям указанных показателей. Для нахождения оптимального решения будем применять критерий многофакторности задачи. РФСС, использующие разработанные АВБС и методы обработки информации, должны соответствовать требованиям универсального стандартизированного эффективного мультиплексирования, которое максимально достижимо только в гибридных сетях. В связи с этим существенным является процесс их калибровки.

### **Заключение**

Для построения современных волоконно-оптических сенсорных систем необходимо построение интеррогаторов с высоким разрешением и скоростью опроса, с возможностью одновременного измерения нескольких физических величин. Такими методами, могут быть радиотонные методы интеррогации, использующие перенос измеряемой информации в радиочастотную область, что позволит повысить скорость опроса, разрешающую способность, чувствительность, отношение сигнал/шум и

---

диапазон измерений. При этом должны сохраняться преимущества двух- или многочастотного зондирования датчиков для проведения измерений на радиочастоте огибающей биений между двумя или несколькими составляющими зондирующего излучения, лежащей в области минимальных шумов фотоприемника.

Как основной недостаток рассмотренных выше РФСС выделено отсутствие адресности ВБР, что приводит к необходимости построения сложных систем зондирования и интеррогаторов как настроенных на различные длины волн ВБР, так и объединенные в группы по общей центральной длине волны.

Оценки показывают, что для построения РФСС с улучшенными характеристиками по метрологии и стоимости можно использовать: широкополосный лазерный источник от оптико-электронных интеррогаторов, но с меньшей полосой, в размере изменения центральной длины волны в диапазоне измерений физического параметра; однотипные ВБР с равной полосой пропускания и одинаковой центральной длиной волны, что обеспечит малую стоимость РФСС и выполнение требований минимизации типов используемых в них ВБР.

Основным отличием в первом случае будет являться формирование в структуре ВБР двух симметричных дискретных фазовых сдвигов (ДСДФС), которые определяют наличие в спектре двух окон прозрачности и уникальный разнос частот между ними. Во втором случае необходимо формировать две идентичные сверх узкополосные (ДИС) ВБР, также с уникальным разномом между ними. При этом, данный разнос обеспечивает полную адресность измерений и обработку сигналов в области минимальных собственных шумов фотоприемника по огибающей биений между составляющими излучения окон прозрачности ВБР с ДСДФС и ДИС ВБР на уникальной и известной разностной частоте без необходимости поиска центральной длины

---



волны каждой из решеток. Таким образом, ВБР с ДСДФС или ДИС ВБР становятся многофункциональным элементом РФСС – сенсором, генератором двухчастотного оптического излучения, формирователем радиочастоты для обработки измерительной информации и мультиплексором.

Это позволило предложить новый, отдельный класс РФСС, который был назван «Радиофотонные сенсорные системы на адресных волоконных брэгговских структурах». Представлена концепция построения РФСС на основе АВБС, сформирован иерархический классификатор задач синтеза и анализа. Рассмотрены особенности построения как малосенсорных, так и многосенсорных РФСС. При их реализации скорость регистрации данных может быть увеличена до сотен МГц, разрешающая способность до единиц Гц, что определяется параметрами электронного (не оптического) векторного или скалярного анализатора выходного спектра АВБС.

### Литература

1. Нуреев И.И. Радиофотонные амплитудно-фазовые методы интеррогации комплексированных датчиков на основе волоконных решеток Брэгга // Инженерный вестник Дона. 2016. № 2. URL:ivdon.ru/magazine/ archive/ n2y2016/3581.
2. Нуреев И.И. Сенсорные пассивные оптические сети и ключевые вопросы применения в них волоконных брэгговских решеток // Инженерный вестник Дона. 2016. № 2. URL:ivdon.ru/magazine/archive/ n2y2016/ 3605.
3. Нуреев И.И. Радиофотонные полигармонические системы интеррогации комплексированных датчиков на основе волоконных брэгговских решеток. Часть 1. Радиофотонные полигармонические методы зондирования // Прикладная фотоника. 2016. Т. 3. № 3. С. 193-220.

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

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

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

7. Triana A., Pastor D. Interrogation of super-structured FBG sensors based on discrete prolate spheroidal sequences // Proc. SPIE. V. 10231. P. 102310H.

8. Мисбахов Р.Ш. и др. Волоконные брэгговские решетки с двумя фазовыми сдвигами как чувствительный элемент и инструмент мультиплексирования сенсорных сетей // Инженерный вестник Дона. 2017. № 3. URL:ivdon.ru/magazine/archive/n3y2017/4343.

9. Gasulla I., Capmany J. Analytical model and figures of merit for filtered microwave photonic links // Opt. Express. 2011. V. 19, no. 20. pp. 19758-19774.

10. Capmany J., et al. Innovative Concepts in Microwave Photonics // Waves. 2012. no. 4. pp. 43-58.

11. Aybatov D.L., Morozov O.G., Sadeev T.S. Dual port MZM based optical comb generator for all-optical microwave photonic device // Proc. of SPIE. 2011. V. 7992. P. 799202.

12. Natanson O.G., et al. Development problems of frequency reflectometry for monitoring systems of optical fiber structures // Proc. of SPIE. 2005. V. 5854. pp. 215-223.

---



13. Il'in G.I., Morozov O.G., Il'in A.G. Theory of symmetrical two-frequency signals and key aspects of its application // Proc. of SPIE. 2014. V. 9156. P. 91560M.

14. Morozov O.G. RZ, CS-RZ and soliton generation for access networks applications: problems and variants of decisions // Proc. of SPIE. 2012. V. 8410. P. 84100P.

15. Морозов О.Г. и др. Модуляционные методы формирования спектрально чистого двухканального полигармонического излучения с одинаковой разностной частотой и поляризационным мультиплексированием. Постановка задачи // Инженерный вестник Дона. 2017. № 4. URL:ivdon.ru/magazine/archive/n4y2017/4587.

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

17. Сахабутдинов А.Ж. и др. Характеризация резонанса Фано в оптических биосенсорах рефрактометрического типа на основе кольцевых волоконных брэгговских решеток с  $\pi$ -сдвигом. Постановка задач моделирования // Инженерный вестник Дона. 2018. № 2. URL:ivdon.ru/magazine/archive/n2y2018/5002.

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

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

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

---



## References

1. Nureev I.I. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2016, № 2. URL:ivdon.ru/magazine/archive/n2y2016/3581.
  2. Nureev I.I. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2016, № 2. URL:ivdon.ru/magazine/archive/n2y2016/3605.
  3. Nureev I.I. Prikladnaya fotonika. 2016. V. 3. № 3. pp. 193-220.
  4. Nureev I.I. Prikladnaya fotonika. 2016. V. 3. № 3. pp. 221-251.
  5. Nureev I.I. Prikladnaya fotonika. 2017. V. 4. № 2. pp. 139-170.
  6. Xu O., Zhang J., Yao J. Optics Letters. V. 41, no. 21. pp. 4859-4862.
  7. Triana A., Pastor D. Proc. SPIE. V. 10231. P. 102310H.
  8. Misbakhov R.Sh, J., et al. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2017, № 3. URL:ivdon.ru/magazine/archive/n3y2017/4343.
  9. Gasulla I., Capmany J. Opt. Express. 2011. V. 19, no. 20. pp. 19758-19774.
  10. Capmany J., et al. Waves. 2012. no. 4. pp. 43-58.
  11. Aybatov D.L., Morozov O.G., Sadeev T.S. Proc. of SPIE. 2011. V. 7992. P. 799202.
  12. Natanson O.G., et al. Proc. of SPIE. 2005. V. 5854. pp. 215-223.
  13. Il'in G.I., Morozov O.G., Il'in A.G. Proc. of SPIE. 2014. V. 9156. P. 91560M.
  14. Morozov O.G. Proc. of SPIE. 2012. V. 8410. P. 84100P.
  15. Morozov O.G., et al. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2017, № 4. URL:ivdon.ru/magazine/archive/n4y2017/4587.
  16. Sakhabutdinov A.Zh., et al. Nelinejnyj mir. 2015. V. 13. № 8. pp. 32–38.
  17. Sakhabutdinov A.Zh., et al. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2018, № 2. URL:ivdon.ru/magazine/archive/n2y2018/5002.
  18. Sadykov I.R., Morozov O.G., Sadeev T.S. Proc. of SPIE. 2012. V. 8410. P. 84100F.
-



19. Stepustchenko O.A., et al. Proc. of SPIE. 2011. V. 7992. P. 79920D.
20. Nasibullin A.R., Vaziev T.O., Morozov O.G. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2017, № 4. URL:[ivdon.ru/magazine/archive/n4y2017/4451](http://ivdon.ru/magazine/archive/n4y2017/4451).