

Технологии радиофотоники для радиотехники, сенсорики и микроволновой радиометрии

А.А. Кузнецов¹, А.Ж. Сахабутдинов¹, И.Н. Ростокин²

¹ ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ», 420111 г. Казань, ул. К. Маркса, 10, E-mail: AAKuznetsov@kai.ru;

² Муромский институт (филиал) ФГБОУ ВО «Владимирского государственного университета им. А.Г. и Н.Г. Столетовых», 602264, г. Муром, Владимирской обл., ул. Орловская 23, E-mail: rostokin.ilya@yandex.ru.

В докладе представлены ключевые направления развития радиофотоники, реализуемые в КНИТУ-КАИ и ориентированные на применение в радиотехнических и сенсорных системах. Основное внимание уделено трём взаимодополняющим направлениям: радиофотонной обработке сигналов с использованием технологии сверхузкополосного пакета дискретных частот (СПДЧ); волоконно-оптическим сенсорным системам на основе адресных и многоадресных волоконных брэгговских структур (АВБС и МАВБС); а также комбинированным интерферометрическим решениям для многопараметрических измерений. Описаны принципы реализации, конструктивные особенности и области практического применения указанных технологий. Особое внимание уделено вопросам миниатюризации, электромагнитной совместимости и построения масштабируемых распределённых сенсорных сетей нового поколения.

Ключевые слова: радиофотоника; сверхузкополосный пакет дискретных частот; адресные волоконные брэгговские решётки; многоадресные волоконные брэгговские структуры; радиофотонные сенсорные системы; векторный анализатор; многочастотное зондирование; оптические сенсоры; миниатюризация измерительных систем; электромагнитная совместимость; распределённый мониторинг; гибридные интерферометрические системы.

Radiophotonics technologies for radio engineering, sensing and microwave radiometry

A.A. Kuznetsov¹, A.Zh. Sakhabutdinov¹, I.N. Rostokin².

¹ Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev–KAI, 10, K. Marx St., Kazan, Tatarstan 420111, Russia.

² Murom Institute (branch) of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "A.G. and N.G. Stoletovs Vladimir State University", 602264, Murom, 23, Orlovskaya str.

The report presents the key areas of development in microwave photonics pursued at KNRTU-KAI, with a focus on applications in radio engineering and sensing systems. Special attention is given to three complementary directions: microwave-photonic signal processing based on the ultra-narrowband package of discrete frequencies (UNB-PDF); fiber-optic sensor systems employing addressed and multi-addressed fiber Bragg gratings (AFBGs and MAFBGs); and hybrid interferometric solutions for multiparametric measurements. The principles of implementation, design features, and practical applications of these technologies are discussed. Emphasis is placed on miniaturization, electromagnetic compatibility, and the development of scalable distributed sensor networks of the new generation.

Key words: microwave photonics; ultra-narrowband package of discrete frequencies; addressed fiber Bragg gratings; multi-addressed fiber Bragg gratings; microwave-photonic sensor systems; vector analyzer; photonic interrogators; multi-frequency probing; optical sensors; miniaturized measurement systems; electromagnetic compatibility; distributed monitoring; hybrid interferometric systems.

Введение

В последние десятилетия радиофотоника как междисциплинарное направление уверенно занимает стратегически важную позицию на стыке радиотехники, оптики и фотоники. Она позволяет объединить достоинства обеих областей — ширину полосы, низкий фазовый шум и электромагнитную совместимость оптики с гибкостью и развитой элементной базой радиотехники. Радиофотонные технологии находят широкое применение в задачах измерения, интеррогации сенсоров, обработки и анализа сигналов, спектроскопии, а также в системах связи нового поколения.

Особое место в формировании этого научного и технологического пласта принадлежит казанской радиофотонной научной школе, базирующейся в КНИТУ-КАИ. Казанская научная школа радиофотоники берёт своё начало с 90-х годов прошлого века, когда в университете начались активные исследования в области оптических измерительных технологий и СВЧ-диагностики. Ключевым вкладом в становление казанской школы стал вклад её основателя — почётного работника сферы образования Российской Федерации (2020) и заслуженного работника высшей школы Республики Татарстан (2017), доктора технических наук профессора Олега Геннадьевича Морозова.

С момента основания кафедры радиофотоники и микроволновых технологий в КНИТУ-КАИ [1] именно его научное видение, глубокие знания в области прикладной электродинамики и оптоэлектроники, вкупе со способностью сформировать высокоэффективный научный коллектив, стали основой зарождения и устойчивого развития данного направления. Под его руководством была создана система подготовки специалистов и аспирантов, построены уникальные экспериментальные установки, защищены десятки кандидатских и докторских диссертации, получены приоритетные патенты, опубликованы статьи в высокорейтинговых журналах. Все это стало основой становления научного направления, получившего название казанской школы радиофотоники, включающей в себя векторную спектроскопию и сенсорику.

Профессор Морозов был инициатором первых работ по радиофотонному зондированию и анализу спектральных характеристик радиочастотных устройств с использованием оптических методов. Именно он предложил ключевые идеи, положившие начало исследованиям в области радиофотонных интеррогаторов, адресных и многоадресных волоконных брэгговских решеток, радиофотонных сенсорных систем на основе многочастотного оптического зондирования. Эти идеи были развиты его учениками и научными последователями, среди которых — И.И. Нуреев, А.Ж. Сахабутдинов, А.А. Кузнецов и другие, внесшие существенный вклад в развитие методологических основ, теоретических моделей и практических решений.

Благодаря системной работе нескольких научных поколений, сформировалось устойчивое ядро исследовательских направлений, объединённых общей целью: создание и развитие интеллектуальных радиофотонных систем нового поколения для решения задач измерения, диагностики и мониторинга. На современном этапе казанская научная школа охватывает широкий спектр задач, включающих разработку теоретических моделей и алгоритмов, обработку радиофотонных сигналов, создание прикладных решений, в том числе, радиофотонных векторных анализаторов, оптических сенсорных платформ, мультиадресных волоконно-оптических сенсорных линий.

Фундаментальными достижениями школы являются: разработка теории и технологии сверхузкополосного пакета дискретных частот (СПДЧ) как зондирующего сигнала для радиофотонных анализаторов [2; 3]; построение адресных [4; 5] и многоадресных [6] волоконных брэгговских (АВБС и МАВБС) сенсорных систем, позволивших перейти от точечных сенсоров к масштабируемым распределённым системам [7]; создание комбинированных интерферометрических систем [8], сочетающих преимущества различных физических механизмов; а также интеграция радиофотонных технологий в критически

важные сферы — транспорт, энергетику, аэрокосмос, медицину и промышленную инфраструктуру [9–11].

Доклад представляет собой обобщение результатов, полученных научным коллективом КНИТУ-КАИ в рамках радиофотонного направления. Она охватывает как фундаментальные основы, так и прикладные аспекты, опираясь на уникальные экспериментальные базы, численные модели и реализованные прототипы.

1. Сверхзкополосный пакет дискретных частот

Сверхзкополосный пакет дискретных частот (СПДЧ) — основа векторного анализа нового поколения, нового класса зондирующего излучения, лежащего в основе радиофотонных векторных анализаторов [12]. Современные методы анализа спектральных характеристик оптических и оптико-электронных устройств, как правило, базируются на принципах одномодовой генерации, амплитудной или частотной модуляции. Однако такие методы страдают от ограниченного частотного разрешения, высокой чувствительности к шуму фотоприёмника и необходимости перестройки генератора для построения полной характеристики.

В ответ на эти ограничения в КНИТУ-КАИ был предложен новый подход — формирование когерентного многокомпонентного сигнала с детерминированной внутренней структурой, получившего название сверхзкополосный пакет дискретных частот. СПДЧ — это оптическое зондирующее излучение, содержащее две и более частотные компоненты с фиксированными разностными частотами и строгими фазовыми соотношениями. Это своего рода когерентный частотный гребень, синтезируемый с субгерцовым шагом и высокой стабильностью.

Физически СПДЧ является комбинацией полигармонических волн, каждая из которых участвует в интерференционной картине. Важно, что не только амплитудные, но и фазовые параметры компонента сигнала несут информацию об исследуемом объекте.

Сверхзкополосный пакет дискретных частот реализуется с помощью электрооптической тандемной модуляции при котором лазерное излучение проходит через модуляторы Маха – Цендера или электроабсорбционные структуры, управляемые полигармоническим сигналом [12; 13]. В результате получается зондирующее поле, в котором каждая частота связана с заданной фазой и амплитудой.

Информационная структура СПДЧ обладает высокой ёмкостью. При прохождении такого сигнала через исследуемый объект или систему, каждый частотный компонент зондирующей гребенки изменяет амплитуду и фазу пропорционально собственному отклику, что делает возможным одновременное и непрерывное измерение, рис. 1.

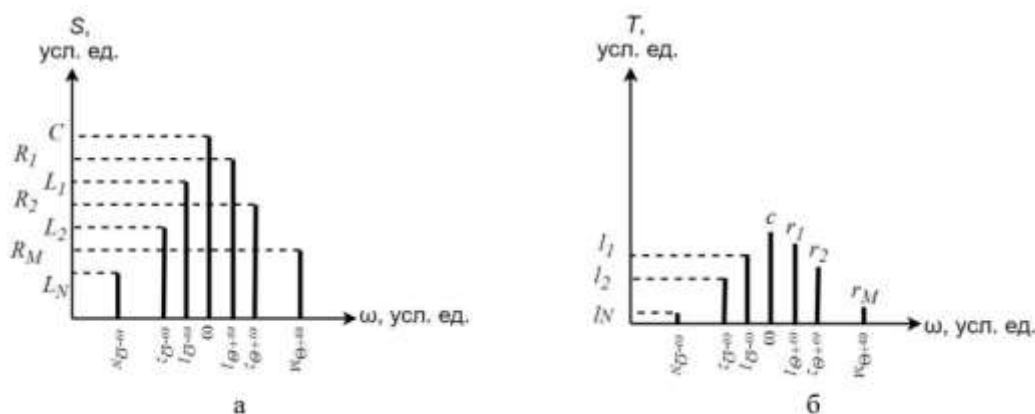


Рис. 1 Произвольный по структуре n -частотный СПДЧ:

а) – до и б) – после прохождения через контур исследуемого устройства

Одновременное использование нескольких компонент позволяет проводить много-частотное зондирование без перестройки центральной частоты одновременно с восстановлением фазово-частотных характеристик с высокой точностью. Кроме того, получать сведения о нелинейных, асимметричных и дисперсных свойствах зондируемого устройства. При правильно подобранной частотной структуре биения между компонентами могут быть использованы как измерительная шкала, что открывает возможности фазового декодирования.

В отличие от традиционных сигналов с одной несущей или простыми модуляциями, СПДЧ обеспечивает повышенную спектральную селективность — до десятков герц; устойчивость к шуму фотоприемника; отсутствие необходимости перестройки частоты генератора; совместимость с волоконно-оптическими и интегральными фотонными системами. Эксперименты показали, что использование СПДЧ позволяет повысить отношение сигнал/шум на 5–6 дБ и добиться высокой фазовой стабильности [14; 15].

Технология СПДЧ реализована в прототипах радиофотонных векторных анализаторов; сенсорных систем на основе волоконных брэгговских решёток; интеррогаторов резонансных датчиков и микроволновых устройств; интегральных фотонных структур с узкополосными характеристиками.

По сути, СПДЧ — это не просто зондирующее излучение, а новый метрологический инструмент, позволяющий перейти от точечных измерений к пространственно-спектральному анализу в реальном времени. Его потенциал уже подтверждён практикой, а дальнейшее развитие технологии связано с интеграцией в гибридные фотонные чипы и сенсорные платформы.

2. Адресные и многоадресные волоконные брэгговские структуры

Волоконные брэгговские решётки (ВБР) являются признанными чувствительными элементами в составе волоконно-оптических сенсорных систем [16]. Однако классические методы мультиплексирования по длине волны, времени или частоте при увеличении числа сенсоров сталкиваются с проблемой спектрального перекрытия и потери адресности сенсоров. В казанской научной школе радиофотоники был предложен альтернативный подход, основанный на использовании адресных [5] и многоадресных [17] волоконных брэгговских структур (АВБС и МАВБС).

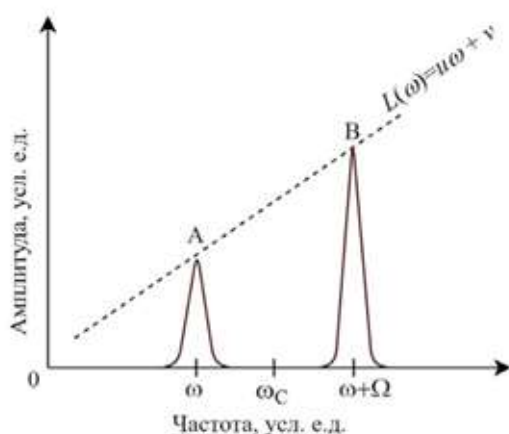


Рис. 2 Форма спектрального отклика АВБС после прохождения наклонного фильтра

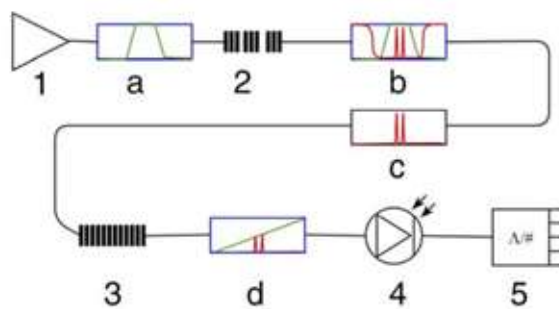


Рис. 3 Функциональная оптоэлектронная схема опроса АВБС, построенная на анализе прохождения оптического сигнала

Адресная волоконная брэгговская структура (АВБС) — модифицированная ВБР, содержащая две узкополосные спектральные компоненты, разнесённые на фиксированную частотную величину, которая является уникальной и инвариантной по отношению к внешним воздействиям [18]. Такая адресная частота регистрируется на фотоприемнике в виде радиочастотного биения и служит цифровым идентификатором сенсора. Это позволяет опрашивать множество АВБС в едином волокне, используя один фотодетектор и методы радиофотонной интеррогации.

В рамках развития адресных сенсорных технологий на основе ВБР были разработаны различные типы структур, отличающиеся принципами генерации адресной метки и конфигурацией спектра. Наибольшее распространение получили две топологии: 2λ -FBG и 2π -FBG [19]. Обе схемы реализуют частотно-инвариантную адресацию, но используют принципиально различные физические механизмы.

АВБС типа 2λ -FBG — двухкомпонентная структура, состоящая из двух последовательно записанных узкополосных ВБР, отражающих на длинах волн λ_1 и λ_2 . Разностная частота между ними ($\Delta\Omega$) при фотонном смещении преобразуется в уникальный радиочастотный сигнал, используемый как адресная метка. Спектр отражения содержит два пика шириной не более 0.05 нм (в зависимости от записи), обычно разнесённых на частоты от 100 МГц до нескольких ГГц.

Преимущества: простая реализация; высокая спектральная селективность; совместимость с радиофотонными интеррогаторами; инвариантность адресной частоты к воздействию температуры или давления (при симметричной нагрузке). Применения: распределённые сенсорные сети; деформационные и температурные датчики в энергетике, транспорте и строительстве.

АВБС типа 2π -FBG — единая ВБР с двумя внутренними фазовыми π -сдвигами, образующими резонансные моды внутри отражающей зоны. Каждая π -аномалия создаёт локализованную моду внутри запрещённой зоны спектра, в результате чего структура отражает две когерентные линии, аналогично 2λ -FBG, но в пределах одного непрерывного волокна. Формирование π -сдвигов достигается локальной модуляцией фазы постоянной решётки в процессе записи (например, через фазовые маски, селективное УФ-облучение или поточечной записью). Получаемые пики обладают сверхвысокой добротностью и минимальной спектральной шириной.

Преимущества: компактность (вся структура — в одном сегменте волокна); повышенная механическая прочность; высокая стабильность спектра; возможность интеграции в миниатюрные модули и волоконные катетеры. Применения: биомедицинская диагностика; интегральные сенсорные головки; задачи, требующие минимальных размеров и высокой точности адресации.

Развитие идеи АВБС привело к созданию многоадресных волоконных брэгговских структур (МАВБС). Они формируются либо за счёт введения нескольких фазовых π -сдвигов в периодическую структуру решетки, либо путём последовательной записи нескольких узкополосных ВБР. В результате отражённый спектр содержит три и более компонент, биения между которыми образуют набор адресных частот. Это позволяет повысить точность определения центральной длины волны; увеличить количество одновременно обслуживаемых сенсоров; повысить устойчивость к шумам и спектральным наложениям.

Информационная структура отклика АВБС и МАВБС характеризуется высокой плотностью частотной адресации и возможностью цифровой обработки. Для регистрации применяется схема с наклонным спектральным фильтром и широкополосным фотоприемником, позволяющая считывать сигналы в реальном времени без необходимости спектрометрического анализа.

Преимущества систем подобного класса заключается в уникальной адресуемости каждого сенсора; возможности масштабируемого мультиплексирования; простоте аппаратной реализации; совместимости с СПДЧ и радиофотонными платформами. Что позволяет их применять как в мониторинге инженерных конструкций; авиационной и транспортной индустрии; энергетике, нефтегазовой отрасли; медицинской диагностике и биомеханике.

Таким образом, АВБС и МАВБС являются ключевыми элементами радиофотонных сенсорных систем нового поколения, обеспечивая высокую информативность, масштабируемость и устойчивость к электромагнитным воздействиям.

3. Перспективы использования методов и устройств радиофотоники в составе микроволновых радиометрических систем

Дистанционное зондирование атмосферы с помощью микроволновых радиометров играет ключевую роль в метеорологии, климатологии и мониторинге окружающей среды. Эти системы измеряют тепловое излучение атмосферы на различных частотах, позволяя определять температуру, влажность, концентрацию газов и профили облачной структуры. Однако традиционные радиоэлектронные методы имеют ограничения по точности, стабильности и многозадачности [21].

Радиофотоника, объединяющая радиочастотные технологии и фотонику, предлагает инновационные решения для преодоления этих барьеров.

За последнее десятилетие радиофотоника стала ключевой технологией для улучшения микроволновых радиометрических систем, обеспечивая высокую стабильность, широкополосность и помехоустойчивость.

Радиофотоника, объединяющая фотонику и микроволновые технологии, предлагает решения этих проблем. Использование оптических компонентов для генерации, обработки и передачи микроволновых сигналов позволяет добиться высокой стабильности, широкой полосы пропускания и миниатюризации устройств.

3.1 Многоканальные оптические вращающиеся сочленения

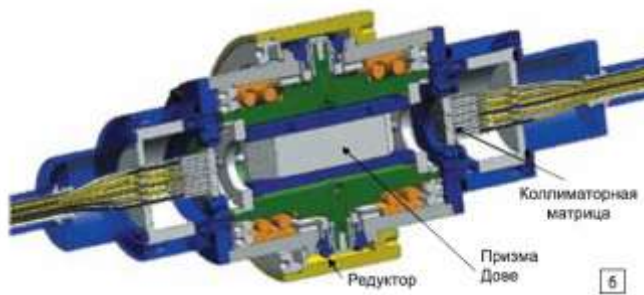
Современная тенденция такова, что разработчики стараются выполнить преобразование аналоговых сигналов из эфира в цифровой код уже на вращающейся части антенны, а передачу данной информации в централизованный блок обработки осуществлять по волоконно-оптической линии.

Это позволяет получить целый ряд преимуществ перед традиционными коаксиальными либо волноводными линиями передачи.

Значительное уменьшение габаритных размеров вращающегося перехода - например, 12 - канальный оптический переход имеет размеры: 106,5 мм в длину и всего 38 мм наружный диаметр в ширину (рис. 4 в).



а)



б)

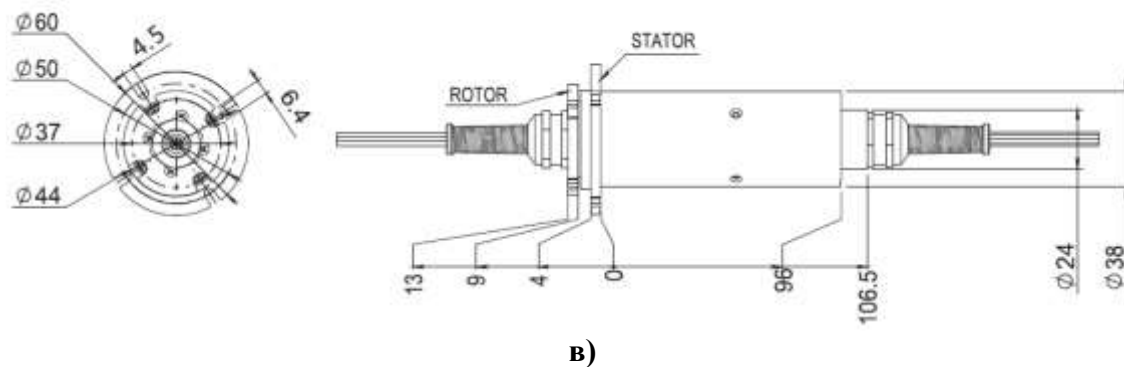


Рис. 4 Многоканальное вращающееся сочленение для передачи оптических сигналов:
а) внешний вид; б) конструкция; в) габаритные размеры

Для применений, где требуется передавать сигнал с антенной системы на относительно большие расстояния (наземная сеть радиотелескопов, корабельная техника, авиация, удаленные рабочие места оператора) использование оптоволоконных линий позволяет это осуществлять практически без отрицательных последствий, в то время как применение коаксиальных или волноводных линий приводит к существенным ограничениям из-за потерь в линии передачи.

Немаловажный фактор - улучшение электромагнитной совместимости такой линии передачи в плане, как эмиссии электромагнитного поля, так и помехоустойчивости, использование радиационно-стойких оптических волокон.

Передача сигнала в цифровом виде исключает возможность его искажения в линии и существенно улучшает его помехозащищенность.

На практике широко применяется технология реализации передачи оптического потока через элемент вращения путем использования призмы Дове и редуктора (рис. 5).

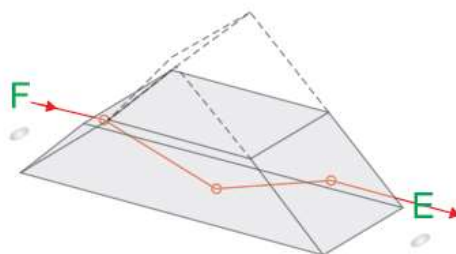


Рис. 5 Прохождение луча через призму Дове

При вращении призмы Дове изображение поворачивается на угол в два раза больше, что позволяет направлять изображение в любом требуемом направлении. Таким образом, при использовании редуктора скоростей удалось добиться точного позиционирования лучей на ответной части перехода и возможности реализации вплоть до 42 каналов на один вращающийся переход [22].

3.2 Радиотонный тракт передачи сигналов промежуточной частоты много-частотной микроволновой радиометрической системы

Структурная схема лабораторного стенда для исследования радиотонного тракта передачи сигналов промежуточной частоты микроволновой радиометрической системы представлена на рис. 6 [23].

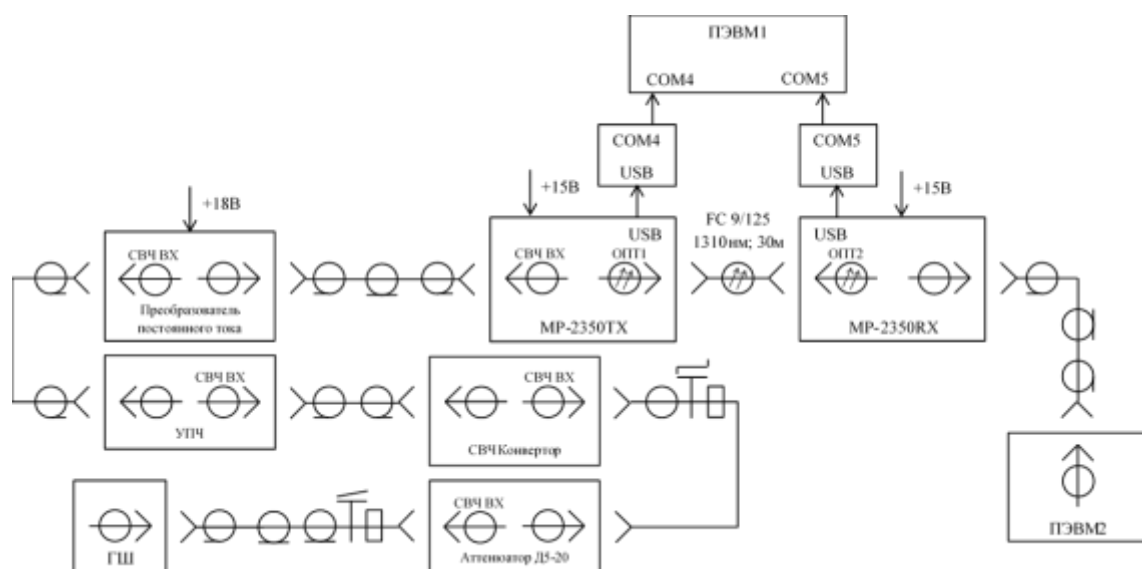


Рис. 6 Структурная схема радиофотонного тракта передачи сигналов промежуточной частоты

Для практической оценки потерь радиошумового сигнала при прохождении радио-частотного и радиофотонного тракта передачи микроволновых сигналов был собран лабораторный стенд, представленный на рис. 7.



Рис. 7 Состав радиофотонного тракта передачи сигналов промежуточной частоты многочастотной микроволновой радиометрической системы

Основой лабораторного стенда для испытания радиофотонной линии передачи СВЧ сигналов промежуточной частоты радиометрической системы являются радиофотонный передатчик MP-2350 TX и радиофотонный приемник MP-2350 RX фирмы «Microwave Photonic Systems, Inc.» внешний вид которых представлен на рис. 7, технические характеристики приведены в таблицах 1 и 2 соответственно.

Радиофотонный передатчик MP-2350 TX имеет структурную схему, показанную на рис. 8.

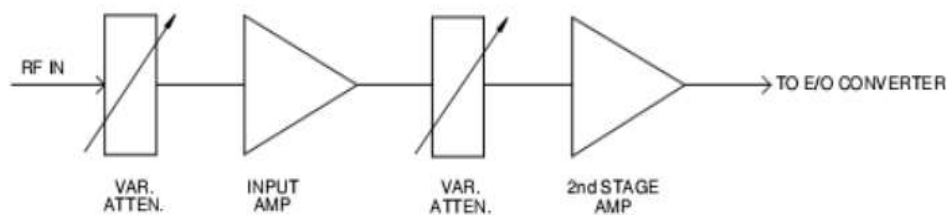


Рис.8 Структурная схема радиопотонного передатчика MP-2350 TX

Как видно из схемы, передатчик имеет два регулируемых аттенюатора: входной и межкаскадный (расположенный между двумя каскадами усилителя). Пользовательский интерфейс управления позволяет регулировать оба аттенюатора.

Таблица 1. Технические характеристики радиопотонного передатчика MP-2350 TX

Оптический канал	
Рабочая длина волны	1310 или 1550 нм \pm 2.0 нм
Уровень оптической мощности (мин)	+3.0 дБм \pm 0.5 дБм
Допустимое обратное отражение (макс)	35 дБ
Классификация лазерных диодов	Класс 3А
Радиочастотный канал	
Полоса модуляции	1.0 МГц ... 3.5 ГГц
КСВН (мин)	2.0:1
1 дБ Уровень компрессии (мин)	+1.0 дБм
Входной уровень IP-3 (мин)	+13.0 дБм
Входной уровень повреждения	+15.0 дБм

Радиопотонный приемник MP-2350 RX имеет структурную схему, показанную на рис. 9.

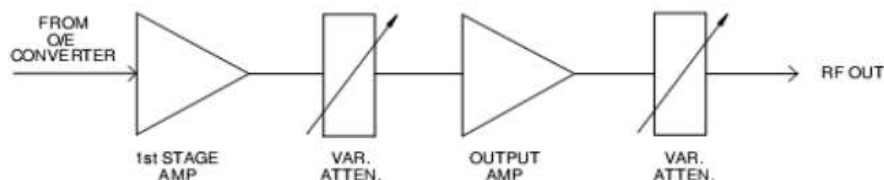


Рис.9 Структурная схема приемника MP-2350 RX

Как и передатчик, приемник имеет два регулируемых аттенюатора (межкаскадный и выходной), которые могут быть настроены через интерфейс управления пользователя.

Таблица 2. Технические характеристики радиопотонного приемника MP-2350 RX

Оптический канал	
Рабочая длина волны	1200 нм ... 1600 нм
Входной уровень (макс)	+ 5 дБм
Входное обратное отражение	-55 дБ ... -63 дБ
Порог оптической неисправности	-12 дБм
Радиочастотный канал	
Полоса пропускания	1.0 МГц ... 3.5 ГГц
Усиление (мин)	28.0 дБ
1 дБ Уровень компрессии (мин)	+ 18.0 дБм
Коэффициент шума (макс)	3.0 дБ

Для снижения потерь сигналов промежуточной частоты микроволновой радиометрической системы, а, следовательно, и повышения ее чувствительности предложено введение в состав системы устройств радиофотоники.

Для оценки эффективности перехода на оптическую линию связи многочастотного радиометра с АЦП, проведены экспериментальные исследования по включению в состав системы оптического приемно-передающего модуля (радиофотонный передатчик МР-2350 TX и радиофотонный приемник МР-2350 RX) с оптическим кабелем длиной (33 м) аналогичной радиочастотному кабелю, по которому передается радиосигнал на промежуточной частоте от радиометров до квадратичного детектора и АЦП.

Для адекватности сравнения характеристик радиочастотного и оптического канала измерения проводились при подаче на вход многочастотного модового разделителя шумового сигнала от полупроводникового генератора шума.

Полученные результаты показали существенное снижение потерь сигнала, достигающее 10 дБ, что позволило рассмотреть перспективу перевода многочастотной микроволновой радиометрической системы на оптический канал связи с необходимостью выбора и обоснования схемотехнического и конструктивного решения передачи всех выходных сигналов радиометров на промежуточной частоте, сосредоточенных в одной частотной области спектра [24-26].

Заключение

Представленные в докладе результаты отражают системный и многолетний подход научной школы КНИТУ-КАИ к разработке радиофотонных технологий нового поколения. На примере сверхузкополосного пакета дискретных частот (СПДЧ), адресных и многоадресных волоконных брэгговских структур (АВБС и МАВБС) продемонстрирована возможность создания высокоточных, масштабируемых и помехоустойчивых сенсорных и измерительных систем. Разработанные решения обладают высоким потенциалом для внедрения в критически важные отрасли — от аэрокосмической техники и энергетики до биомедицинской диагностики и промышленного мониторинга.

Совокупность теоретических моделей, экспериментальных установок и реализованных прототипов подтверждает эффективность и практическую применимость предложенных подходов. Будущие исследования будут направлены на дальнейшую миниатюризацию, интеграцию с фотонными чипами, а также расширение функциональности радиофотонных платформ за счёт гибридных и мультифизических решений.

Микроволновые радиометрические системы являются одним из основных инструментов дистанционного зондирования атмосферы, обеспечивая измерения температуры, влажности, концентрации облачных частиц и других параметров. Современные требования к повышению пространственного и спектрального разрешения, а также к минимизации массогабаритных характеристик оборудования стимулируют внедрение радиофотонных технологий.

В работе рассмотрены принципы интеграции радиофотонных устройств в многочастотные радиометрические системы, их преимущества в контексте широкополосной обработки сигналов, генерации стабильных опорных частот и формирования диаграммы направленности антенны. Анализируются перспективы применения таких систем для мониторинга атмосферных процессов, включая прогнозирование экстремальных погодных явлений.

Включение в состав микроволновых систем дистанционного зондирования элементов радиофотоники позволило снизить потери сигнала при передаче его к оконечным устройствам обработки, что в целом способствует повышению чувствительности систем.

Таким образом, наземные многочастотные микроволновые радиометрические системы дистанционного зондирования атмосферы и измерительно-прогностические комплексы обнаружения и отслеживания развития опасных атмосферных явлений логически должны развиваться в направлении расширения рабочего диапазона систем в область длинных волн, разработки методик оценки пространственно-структурных характеристик области осадков с переходом к численному моделированию в оперативном режиме оценки интенсивности осадков с применением нейронных сетей и адаптивным регулированием чувствительности при включении в состав систем устройств радиофотоники.

Работа выполнена за счет средств Программы стратегического академического лидерства Казанского национального исследовательский технического университета имени А. Н. Туполева («ПРИОРИТЕТ-2030»).

Литература

1. Морозов О.Г. Колонка редактора / О.Г. Морозов // Электроника, фотоника и киберфизические системы. – 2021. – Т. 1. – № 2. – С. 5-6.
2. Кузнецов А.А. Сравнительная оценка способов формирования излучений в виде сверхузкополосного пакета дискретных частот / А.А. Кузнецов // Инженерный вестник Дона. – 2021. – № 9 (81). – С. 44-51.
3. Кузнецов А.А. Методы и средства радиофотонного векторного анализа на основе сверхузкополосного пакета дискретных частот как нового типа зондирующего излучения: : Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / А.А. Кузнецов. – Казань: КНИТУ-КАИ, 2021. – 330 с.
4. Overview of Addressed Fiber Bragg Structures' Development / T. Agliullin [et al.] // Photonics. – 2023. – Vol. 10. – № 2. – P. 175.
5. Morozov O.G. Addressed fiber bragg structures in quasi-distributed microwave-phonic sensor systems / O.G. Morozov, A.J. Sakhabutdinov // Computer Optics. – 2019. – Т. 43. – № 4. –p. 535-543.
6. Многоадресные волоконные брэгговские структуры в радиофотонных сенсорных системах / Т.А. Аглиуллин [и др.] // Труды учебных заведений связи. – 2020. – Т. 6. – № 1. – С. 6-13.
7. Трехкомпонентные адресные волоконные брэгговские структуры - новый элемент радиофотонных многосенсорных сетей / О.Г. Морозов [и др.] // Фотон-Экспресс. – 2021. – № 6 (174). – С. 166-167.
8. Fiber-optic temperature sensor based on glass Fabry–Perot interferometer / Т.А. Agliullin [и др.] // Applied photonics. – 2023. – Т. 10. – № 5. – p. 58-74.
9. Артемьев Вадим Игоревич. Волоконно-оптическая многосенсорная система контроля износа и усилия прижима токоприемников электроподвижного состава на основе адресных волоконных брэгговских структур: автореферат и дис. канд. техн. наук: 05.11.13 / Артемьев Вадим Игоревич. – Казань, 2019. – 153 с.
10. Система контроля скорости снаряда на выходе ствола с использованием многоадресных волоконных брэгговских решёток / А.Ж. Сахабутдинов [и др.] // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2020. – № 2 (46).
11. Многочастотный и векторный методы мониторинга тонкопленочных фильтров / Т.Р. Сахбиев [и др.]. – Уфимский государственный авиационный технический университет (Уфа), 2018. – С. 205-207.
12. Theory and technology of microwave photonic vector analysis based on an ultra-narrow band package of discrete frequencies as a new type of probing radiation / A.A. Kuznetsov [и др.] // Optical Technologies for Telecommunications 2021 Nineteenth International Scientific

and Technical Conference «Optical Technologies for Telecommunications» / ред. V.A. Burdin [и др.]. – Samara, Russian Federation: SPIE, 2022. – p. 50.

13. Kuznetsov A.A. Optical Vector Analyzers for Multiplicative Fiber Optic Sensors Problem. Formulation of the Problem / A.A. Kuznetsov // 2021 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications. – 2021. – p. 1-5.

14. Василец А.А. Симметричный оптический векторный анализатор на основе тандемной амплитудно-фазовой модуляции / А.А. Василец // Научно-Технический Вестник Поволжья. – 2020. – № 12.

15. Амплитудно-фазовый векторный анализатор для характеристики спектральных параметров симметричных оптических структур / А.А. Василец [и др.]. – Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 2021. – С. 143-145.

16. Study of FBG-based optical sensors for thermal measurements in aerospace applications / A. Aimasso [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. – 2022. – Vol. 2293. – № 1. – P. 012006.

17. Multi-Addressed Fiber Bragg Structures for Microwave-Photonic Sensor Systems / O. Morozov [и др.] // Sensors. – 2020. – Т. 20. – № 9. – С. 2693.

18. Морозов О.Г. Адресные волоконные брэгговские структуры в квазираспределённых радиофотонных сенсорных системах / О.Г. Морозов, А.Ж. Сахабутдинов // Компьютерная оптика. – 2019. – Т. 43. – № 4. – С. 535-543.

19. Сахабутдинов А.Ж. Радиофотонные сенсорные системы на адресных волоконных брэгговских структурах и их применение для решения практических задач: диссертация ... доктора технических наук / А.Ж. Сахабутдинов. – Казань, 2018. – 487 с.

20. Rostokin I.N., Fedoseeva E.V. Rostokina E.A. Karyayev V.V. Morozov O.G., et al. Design features of microwave photonic radars. // Proc. SPIE 11516, Optical Technologies for Telecommunications 2019, 115160L (22 May 2020); doi: 10.1117/12.2566327 Proc. of SPIE Vol. 11516 115160L-1-6.

21. Zhukov V.Y., Shchukin G.G., Rostokin I.N. Improvement of the all-weather profiler. // Journal of Physics: Conference Series 2140 (2021) 012029.

22. Fedoseeva E.V., Rostokin I.N., Shchukin G.G., Rostokina E.A. Multi-band microwave radiometric sensing of remote rain zones. – Journal of Physics: Conference Series 2020 Russian open scientific conference «Modern problems of remote sensing, radar, wave propagation and diffraction» (MPRSRWPD), 2020, doi:10.1088/1742-6596/1632/1/012012

23. Ростокин И.Н., Федосеева Е.В., Щукин Г.Г., Ростоккина Е.А., Холодов И.Ю., Матюков М.А. Современное состояние и перспективы развития комплексных радиофизических методов исследования параметров атмосферы в научно-исследовательской лаборатории Муромского института ВлГУ. // Всероссийские открытые Армандовские чтения [Электронный ресурс]: Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн / Материалы Всероссийской открытой научной конференции. – Муром: МИ ВлГУ, 2024. – 524 с. С. 16-29. ISSN 2304-0297 (CD-ROM). DOI: 10.24412/2304-0297-2024-1-16-29.

24. Ростокин И.Н., Ростоккина Е.А., Федосеева Е.В., Щукин Г.Г. Оценка использования радиофотонной линии передачи сигналов промежуточной частоты в составе многочастотной СВЧ радиометрической системы. // Материалы XXXIII Всероссийского симпозиума «Радиолокационное исследование природных сред» / под общей редакцией И. В. Сахно; редколлегия: председатель И. В. Сахно, Г. Г. Щукин, В. В. Клейменов [и др.]; ответственный за выпуск: К. С. Грязнова; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского. – Санкт-Петербург: ВКА имени А. Ф. Можайского, 2024. – 588 с. – Текст: непосредственный. С. 571-576.

25. Ростокин И.Н., Ростокина Е.А., Федосеева Е.В., Щукин Г.Г. Комплексные радиофизические исследования атмосферы во Владимирском регионе. // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества [Электронный ресурс]: тезисы докладов III Российской научной конференции (Омск, 8–10 октября 2024 года). – Электрон. текст. дан. – Омск: ОНИИП, 2024. – 305 с. – 1 электрон. опт. диск (DVD-R). С. 112-113. ISBN 978-5-6052462-0-6.

26. Ростокин И.Н., Федосеева Е.В., Ростокина Е.А., Холодов И.Ю., Матюков М.А., Кокуров Н.В. Радиопотонный тракт сигналов промежуточной частоты многочастотной микроволновой радиометрической системы дистанционного зондирования атмосферы. // Электроника, фотоника и киберфизические системы. 2023. Т.2. №3. С.1-11.