

Применение технологий радиофотоники в многочастотных микроволновых радиометрических системах дистанционного зондирования атмосферы.

И.Н. Ростокин¹, Е.В. Федосеева¹, Е.А. Ростоккина¹, Г.Г. Щукин^{1,2}

¹Муромский институт (филиал) ФГБОУ ВО

«Владимирского государственного университета им. А.Г. и Н.Г. Столетовых»,

602264, г. Муром, Владимирской обл., ул. Орловская 23, E-mail: rostockin.ilya@yandex.ru

²АО «Государственный научно-исследовательский навигационно-гидрографический институт, 199106, Санкт-Петербург, Кожевенная линия, 41, e-mail: ggshchukin@mail.ru

Представлено современное состояние и перспективы развития методов и устройств радиофотоники в многочастотных микроволновых радиометрических системах дистанционного зондирования атмосферы. Технологии радиофотоники играют все более значимую роль в развитии систем дистанционного зондирования атмосферы, предлагая решения, которые позволяют преодолеть ограничения традиционных радиоэлектронных систем. Основной эффект от их применения заключается в значительном улучшении основных характеристик: расширении полосы рабочих частот, повышении разрешающей способности, обеспечении высокой стабильности сигналов, устойчивости к электромагнитным помехам и улучшению флуктуационной чувствительности.

Ключевые слова: радиофотоника; дистанционное зондирование атмосферы; многочастотная микроволновая радиометрическая система; двухмодовый облучатель; антенная система.

Application of radiophotonics technologies in multi-frequency microwave radiometric systems for remote sensing of the atmosphere.

I.N. Rostokin¹, E.V. Fedoseeva¹, E. A. Rostokina¹, G.G. Shchukin^{1,2}

¹ 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.

² JSC State Research Navigation and Hydrographic Institute, 41 Kozhevennaya Line, 199106, Saint Petersburg

The paper presents the current state and prospects for the development of radiophotonics methods and devices in multi-frequency microwave radiometric systems for remote sensing of the atmosphere. Radiophotonics technologies are playing an increasingly important role in the development of remote sensing systems for the atmosphere, offering solutions that overcome the limitations of traditional radio-electronic systems. The main effect of their application is a significant improvement in the main characteristics: the expansion of the operating frequency band, increased resolution, high signal stability, resistance to electromagnetic interference, and improved fluctuation sensitivity.

Keywords: radiophotonics; remote sensing of the atmosphere; multi-frequency microwave radiometric system; dual-mode irradiator; antenna system.

Введение

Радиофотоника - междисциплинарная область на стыке радиофизики и оптики. В системах ДЗ она используется для генерации, передачи и обработки радиосигналов оптическими методами. Вместо того чтобы формировать зондирующий сигнал целиком в электронном тракте, в радиофотонных системах это делается с помощью лазеров, модуляторов и волоконно-оптических линий. Это позволяет достичь характеристик, недоступных для классической электроники [1].

Применение технологий радиофотоники в многочастотных микроволновых радиометрических системах - одно из наиболее перспективных направлений развития дистанционного зондирования атмосферы. Исследования в этой области активно ведутся научными группами в России (например, в Муромском институте ВлГУ и КНИТУ-КАИ) [2, 3]. Внедрение радиофотонных методов направлено на преодоление фундаментальных ограничений классической радиоизмерительной аппаратуры, таких как узкая полоса рабочих частот, восприимчивость к помехам и потери в линиях передачи.

Основные направления использования методов и устройств радиофотоники в составе многочастотных микроволновых радиометрических систем можно разделить на следующие ключевые области применений.

Радиофотонные тракты передачи микроволновых сигналов.

Традиционные коаксиальные кабели для передачи сигналов промежуточной частоты (ПЧ) от приемников к устройствам обработки вносят значительные потери, особенно в многочастотных системах, где требуется передача сигналов нескольких диапазонов. Радиофотоника предлагает альтернативу: волоконно-оптические линии передачи (ВОЛП) с внутренней модуляцией [4].

Экспериментальные исследования подтверждают, что применение таких трактов в перспективных микроволновых радиометрических системах не только возможно, но и обеспечивает значительный выигрыш в характеристиках по сравнению с традиционными коаксиальными линиями.

Решение задачи компенсации фоновых шумов радиотеплового излучения.

Одной из ключевых проблем при измерении слабого собственного радиотеплового излучения атмосферы является влияние фоновых шумов (излучение подстилающей поверхности, облаков и т.д.), попадающих в боковые лепестки диаграммы направленности антенны

Предложен метод компенсации [2], основанный на формировании дополнительного сигнала, который равен помеховой составляющей в основном канале. Был создан многочастотный двухмодовый разделитель, позволяющий реализовать эту схему для многочастотной микроволновой радиометрической системы, что открывает путь к созданию эффективных радиофотонных многочастотных измерительных комплексов с компенсацией фоновых помех.

Перспективные сенсоры и обработка микроволновых сигналов.

Помимо трактов передачи и антенных решений, радиофотоника позволяет создавать принципиально новые типы чувствительных элементов на основе волоконно-оптических структур [3].

Адресные волоконные брэгговские структуры выполняют функции чувствительного элемента и одновременно формируют двухчастотное лазерное излучение. Разностная частота является уникальным «адресом» датчика и инвариантна к измеряемым полям, что упрощает мультиплексирование и повышает точность измерений.

Фотонные дифференциаторы и интеграторы.

Устройства на основе волоконных брэгговских решеток позволяют выполнять аналоговую обработку сверхширокополосных сигналов (дифференцирование, интегрирование) непосредственно в оптической области. Это перспективно для формирования зондирующих импульсов сложной формы и высокоскоростной обработки информации [5].

Комбинированные сенсоры.

Ведутся разработки гибридных сенсорных элементов на основе интерферометров Фабри-Перо и брэгговских структур для одновременного измерения нескольких параметров (давление, влажность, температура) с высокой точностью [6].

1. Многочастотная антенная система радиофотонного радиометра

Многочастотная антенная система является одним из ключевых компонентов радиофотонного радиометра, определяющим его чувствительность, частотный диапазон и возможность решения конкретных задач дистанционного зондирования атмосферы. В области радиофотоники требования к антенной системе ужесточаются, поскольку она должна эффективно работать в нескольких диапазонах и обеспечивать высокое качество сигнала для последующей оптической обработки.

Существует несколько вариантов построения многочастотной антенной системы для радиофотонного радиометра:

Многоканальный (многоантенный) подход - использование нескольких отдельных антенн (рупорных, зеркальных, щелевых и т.д.), каждая из которых рассчитана на свой частотный диапазон.

Одноканальный (широкополосный) подход - использование одной широкополосной антенны, способной одновременно принимать сигналы на нескольких частотах.

Гибридный подход - использование одной апертуры, но с несколькими облучателями для разных диапазонов (частотно-селективная поверхность или многодиапазонные облучатели).

Применение радиофотонных технологий накладывает специфические требования к антенной системе.

Широкополосность и многочастотность

Радиофотонный тракт способен обрабатывать сигналы сверхширокой полосы (вплоть до десятков ГГц). Чтобы реализовать это преимущество, антенна также должна быть широкополосной или многочастотной. Чаще всего для атмосферных исследований выбираются ключевые частоты в окнах прозрачности атмосферы и на линиях поглощения (например, 22.2 ГГц - линия водяного пара, 35 ГГц, 60 ГГц - линия кислорода). Антенна должна эффективно работать на этих дискретных частотах, сохраняя стабильные параметры.

Согласование с радиофотонным трактом

Антенна должна быть согласована с входным трактом микроволнового радиометра, который начинается с МШУ. В радиофотонных системах особенно важна минимизация потерь между антенной и МШУ, так как потери непосредственно снижают чувствительность. Поэтому антенна часто проектируется с волноводным или коаксиальным выходом, непосредственно сочленяемым с усилителем [7].

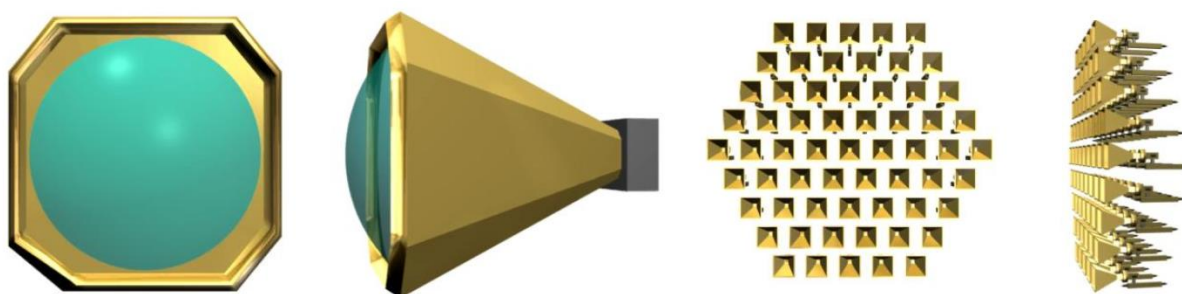


Рис. 1.1 Трехмерная модель волноводной антенной решетки радиофотонного радиометра, использующего преломляющую оптику и волноводную матрицу в фокальной плоскости.

Интеграция с активными элементами

В современных системах все чаще применяют активные антенные решетки (АФАР) или интегральные антенны с встроенными МШУ. Для радиофотонных радиометров это особенно актуально, так как позволяет сразу после антенны получить усиленный сигнал, пригодный для управления электрооптическим модулятором. При этом развязка между антенными элементами и подвод управляющих сигналов могут также осуществляться по волоконно-оптическим линиям.

2. Варианты построения радиофотонных приемных трактов радиометрических систем ДЗА

Приемный тракт выполняет ключевую функцию преобразования принятого радиотеплового излучения, частотной селекции и подготовки к измерению.

Современные исследования и разработки предлагают несколько архитектурных решений для таких трактов, каждое из которых имеет свои особенности и преимущества.

Обобщенная структурная схема, характерная для многочастотного радиофотонного приемного тракта, основанного на переносе принятого СВЧ - сигнала в оптическую область, где и происходит его основная обработка, представлена на рис. 2.1.



Рис. 2.1 Обобщенная структурная схема многочастотного радиофотонного приемного тракта

Радиофотонный радиометр можно представить, как последовательность функциональных блоков, преобразующих слабое радиотепловое излучение атмосферы сначала в электрический сигнал, затем в оптический, и после обработки снова в электрический для регистрации.

Функционирование данной схемы включает в себя следующие основные этапы:

- прием и предварительное усиление: принятый антенной системой многочастотный СВЧ-сигнал усиливается малошумящим усилителем (МШУ);
- электрооптическое преобразование: усиленный сигнал подается на электрооптический модулятор, туда же поступает оптическая несущая от лазера, в результате интенсивность лазерного излучения на выходе модулятора изменяется пропорционально входному СВЧ-сигналу, происходит перенос (называемый также повышающим преобразованием) всего спектра принятого сигнала в оптическую область;

- частотная селекция: модулированный широкополосный оптический сигнал поступает в устройство частотной селекции, где происходит разделение общего спектра на множество узких частотных каналов (полос), соответствующих разным частотам приема микроволнового радиометра;

- фотодетектирование: каждый выделенный оптический канал направляется на свой фотодетектор (или на элементы фотодетекторной матрицы), где происходит обратное преобразование оптического сигнала в электрический, амплитуда полученного электрического сигнала пропорциональна мощности принятого излучения в данной частотной полосе;

- регистрация: электрические сигналы со всех каналов поступают в блок обработки и регистрации для дальнейшего анализа.

Ключевым элементом, определяющим архитектуру всего приемного тракта, является способ частотной селекции.

Анализ современных исследований позволяет выделить три основных подхода.

Классический многоканальный подход с дискретными фильтрами.

Данный подход исторически использовался и в традиционных радиометрах, но в радиофотонной реализации он приобретает новые черты. Сигнал после МШУ делится по нескольким каналам, в каждом из которых установлен свой полосовой фильтр (обычно на промежуточной частоте). Радиофотоника здесь может применяться для передачи сигналов от фильтров к детекторам по оптоволокну, обеспечивая помехозащищенность.

Однако такой подход имеет существенные ограничения. Количество каналов ограничено физическими размерами фильтров и трактов, что особенно критично для малых спутниковых платформ. Кроме того, создание гиперспектральных систем (с числом каналов более 50) становится крайне сложной инженерной задачей.

Современный подход с оптической фильтрацией.

Данный подход в полной мере использует преимущества радиофотоники. Широкополосный оптический сигнал с выхода модулятора направляется в единое устройство - оптический фильтр-банк, который и выполняет роль частотного селектора.

На основе интерферометров и кольцевых резонаторов.

Для создания таких фильтров используются, интерферометры Маха-Цендера с кольцевыми резонаторами. Они обладают периодической частотной характеристикой с прямоугольной формой полосы пропускания. Это позволяет одновременно выделить несколько частотных каналов.

Современные разработки показывают, что такой подход позволяет реализовать системы с очень большим числом каналов. Упомянутые решения, поддерживающие более 50 и даже более 100 частотных каналов, что фактически выводит микроволновую радиометрию на гиперспектральный уровень измерений.

Перспективный подход с использованием оптических гребенок.

Еще более сложный и гибкий метод основан на применении многочастотного оптического гетеродина - так называемой оптической гребенки. В этом случае генерируется множество равноотстоящих по частоте оптических несущих, широкополосный СВЧ-сигнал модулируется на каждой из этих несущих, затем с помощью дополнительных оптических фильтров и демультиплексора выделяются нужные боковые полосы, которые и детектируются. Этот метод называют канализованным приемом. Он позволяет достичь высокой точности измерения частоты и эффективно анализировать сигналы со сложной спектральной структурой.

Для одновременных измерений на нескольких частотах могут использоваться либо несколько параллельных радиофотонных трактов, либо один широкополосный тракт с последующим частотным разделением каналов на промежуточной частоте.

Для компенсации фоновых шумов в структуру может вводиться дополнительный канал, формируемый с помощью двухмодовой антенны и модового разделителя.

В корреляционных радиометрах сигнал от антенны делится на два канала, которые перемножаются после детектирования. Радиофотонные технологии позволяют реализовать широкополосные корреляторы с фотовременной задержкой.



Рис. 2.1 Схематическое изображение радиофотонного радиометра с распределенной апертурой

3. Многочастотный радиофотонный аналого-цифровой преобразователь

После того как широкополосный радиотепловой сигнал был принят антенной, обработан в приемном тракте и разделен на частотные каналы, его необходимо преобразовать в цифровую форму для последующей спектральной обработки, хранения или передачи.

Традиционные электронные АЦП имеют ограничения по частоте дискретизации и динамическому диапазону, особенно при работе с широкополосными сигналами миллиметрового диапазона. Радиофотонные АЦП (ФАЦП) призваны решить эту проблему, перенося ключевые этапы дискретизации в оптическую область.

В зависимости от архитектуры приемного тракта, включение ФАЦП может быть реализовано по-разному, один из вариантов обобщенной структурной схемы представлен на рис. 3.1

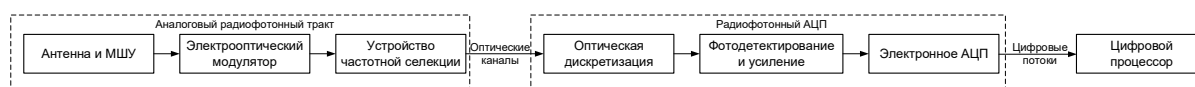


Рис 3.1 Структурная схема микроволнового радиометра с радиофотонным АЦП

Существует несколько подходов к построению ФАЦП. Для многочастотного радиометра дистанционного зондирования атмосферы наиболее перспективными являются архитектуры, обеспечивающие параллельную обработку нескольких частотных каналов.

Фотонная дискретизация с временным стробированием является одной из классических архитектур ФАЦП, хорошо подходящая для одноканальных систем. Для многочастотного радиометра она требует мультиплексирования. Ультракороткие оптические импульсы от лазера подаются на электрооптический модулятор. Аналоговый СВЧ-сигнал (в данном случае - сумма сигналов со всех частотных каналов радиометра или уже разделенный сигнал одного канала) модулирует интенсивность этих импульсов.

На выходе модулятора формируется последовательность «взвешенных» оптических импульсов, амплитуда которых соответствует мгновенным значениям входного сигнала в моменты дискретизации. Затем эта последовательность детектируется и оцифровывается обычным электронным АЦП.

Преимущества: сверхвысокая частота дискретизации (ограничена лишь длительностью импульсов), потенциально очень широкий диапазон частот входного сигнала.

Недостатки: требуется крайне высокая стабильность лазерного источника и синхронизация с ним. Для многочастотной системы потребуются либо один сверхширокополосный канал, либо отдельный модулятор на каждый канал.

Канализированная архитектура с понижением частоты идеально вписывается в структуру многочастотного радиометра, рассмотренную ранее. На вход ФАЦП подается уже разделенный на частотные каналы оптический сигнал (например, с выхода оптического фильтр-банка). Каждый оптический канал, несущий информацию об узкой полосе частот радиометра, направляется на отдельный фотодетектор. Далее сигнал каждого канала преобразуется в цифровую форму отдельным электронным АЦП. Так как каждый канал узкополосный, частота дискретизации может быть невысокой (всего в 2-3 раза выше ширины полосы канала).

Ключевое преимущество: фактически происходит параллельная оцифровка множества узких полос, что эквивалентно оцифровке исходного широкополосного сигнала. Это позволяет использовать относительно недорогие и высокоточные электронные АЦП.

Недостаток: необходимость в высококачественном оптическом фильтр-банке и матрице фотодетекторов с согласованными характеристиками. Требуется точная синхронизация между каналами.

Прямой АЦП на основе электрооптической модуляции с гребенкой наиболее сложный, но и наиболее гибкий подход, объединяющий функции приемного тракта и АЦП. Входной многочастотный СВЧ-сигнал подается на гребенку электрооптических модуляторов (или на один широкополосный модулятор, работающий со всем спектром). С другой стороны, на модуляторы подается многочастотная оптическая гребенка (набор когерентных оптических несущих с равным частотным интервалом). Каждый «зубец» гребенки выполняет функцию переноса (гетеродина) для своей части СВЧ-спектра. В результате на выходе модуляторов формируется набор оптических сигналов, каждый из которых несет информацию об узкой полосе входного спектра, сдвинутую на промежуточную частоту. Эти сигналы могут быть затем демодулированы и оцифрованы.

Преимущества: наибольшая гибкость, возможность реализации полностью оптического спектрального анализа без использования аналоговых фильтров. Высокая точность, задаваемая стабильностью оптической гребенки.

Недостатки: чрезвычайно высокая сложность, необходимость в источниках оптической гребенки с исключительно высокой стабильностью, большие требования к точности изготовления и контроля температуры.

Для создания компактного и надежного ФАЦП, пригодного для установки на малый космический аппарат или БПЛА, критически важна «фотонная интеграция». Основные элементы ФАЦП (лазеры, модуляторы, фильтры, фотодетекторы) стремятся разместить на едином фотонном чипе. Используются платформы на основе кремния (кремний-на-изоляторе), нитрида кремния, фосфида индия или гибридные технологии. Для канализированной архитектуры разрабатываются интегрированные фильтр-банки на основе массива волноводных решеток или кольцевых резонаторов, объединенные на одном чипе с фотодетекторами. Это позволяет создать «радиометр-на-чипе».

4. Структурная схема радиوفотонного тракта передачи промежуточной частоты многочастотной микроволновой радиометрической системы

Структурная схема лабораторного стенда для исследования радиوفотонного тракта передачи сигналов промежуточной частоты микроволновой радиометрической системы представлена на рис. 4.1.

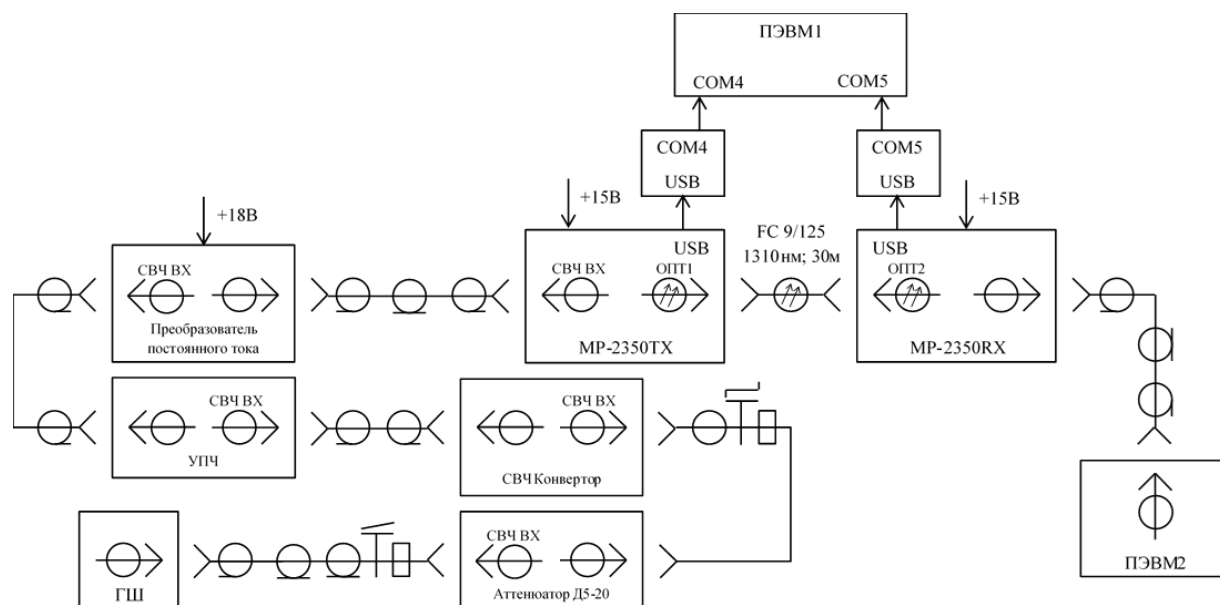


Рис. 4.1 Структурная схема радиوفотонного тракта передачи сигналов промежуточной частоты

Для практической оценки потерь радишумового сигнала при прохождении радиочастотного и радиопотонного тракта передачи микроволновых сигналов был собран лабораторный стенд, представленный на рис. 4.2.



Рис. 4.2 Состав радиопотонного тракта передачи сигналов промежуточной частоты многочастотной микроволновой радиометрической системы

Основой лабораторного стенда для испытания радиопотонной линии передачи СВЧ сигналов промежуточной частоты радиометрической системы являются радиопотонный передатчик MP-2350 TX и радиопотонный приемник MP-2350 RX фирмы «Microwave Photonic Systems, Inc.»

В качестве источника ради шумового сигнала используется модуль микроволнового генератора шума на М31305-4 2.210.121ТУ с установленным на его выходе волноводным аттенуатором от 0 единиц (0дБ) до 100 единиц (33дБ).

Результаты экспериментальных исследований прохождения ради шумового сигнала от полупроводникового генератора шума на ЛПД М31305-4 по коаксиальному тракту промежуточной частоты (длина 33 м.) микроволновой радиометрической системы представлены на рис. 4.3, а также по радиофотонному тракту (длина 33 м.) передачи СВЧ сигналов (рис. 4.4).

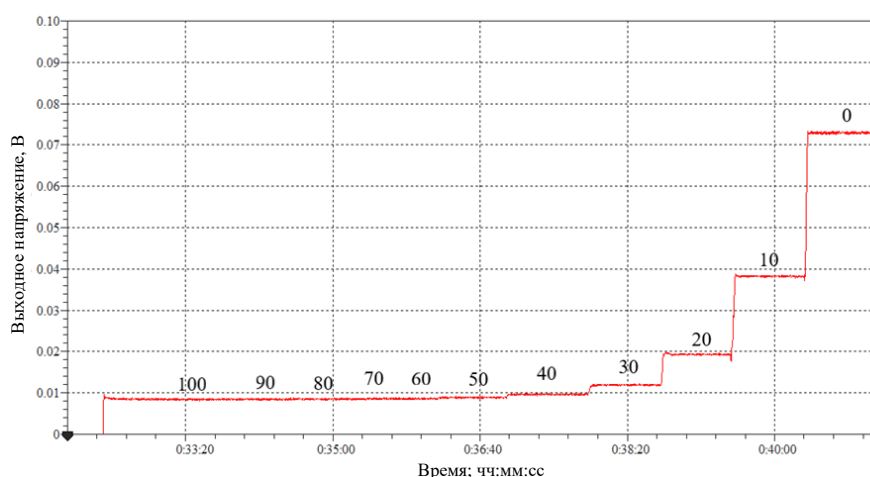


Рис. 4.3 Зависимость выходного напряжения радиометрической системы от уровня генератора шума при прохождении через коаксиальный тракт длиной 33 м

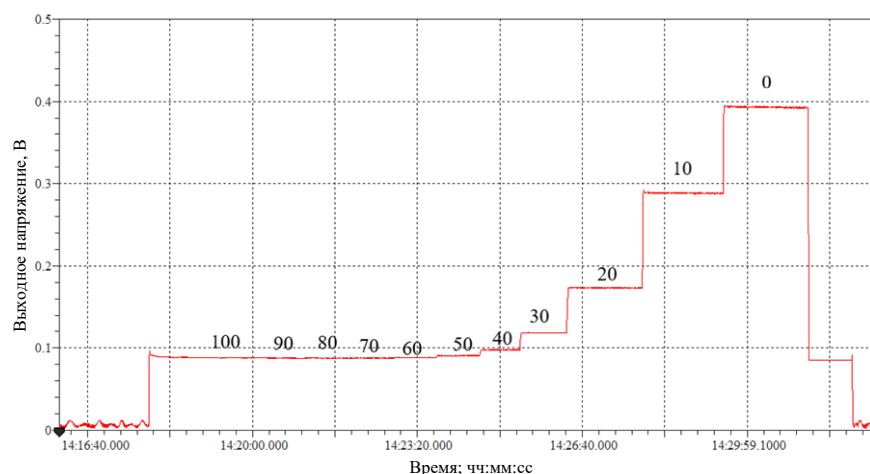


Рис. 4.4 Зависимость выходного напряжения радиометрической системы от уровня генератора шума при прохождении через радиофотонный тракт длиной 33 м

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 схмотехнического и конструктивного решения передачи всех выходных сигналов микроволновых радиометров на промежуточной частоте, сосредоточенных в одной частотной области спектра.

Выводы

Внедрение описанных технологий нацелено на решение конкретных научных и прикладных задач в метеорологии и мониторинге окружающей среды:

- создание систем, способных прогнозировать развитие опасных метеоявлений (ливни, грозы, шквалы) с заблаговременностью в минуты, радиофотонные технологии позволяют повысить чувствительность и точность измерений;
- исследования влажностных характеристик и структурной неоднородности приземного слоя с использованием корреляционной обработки данных в нескольких частотных диапазонах;
- экспериментальные исследования высокоэнергетических явлений по регистрации нетеплового микроволнового излучения (например, на частоте 22.2 ГГц), возникающего в грозовой атмосфере в связи с космическими лучами и пробойными электронами, радиофотонные методы могут быть применены для совершенствования измерительной техники в таких исследованиях.

Для задач дистанционного зондирования атмосферы, где требуется одновременное измерение в десятках спектральных каналов (например, для восстановления вертикальных профилей температуры и влажности по линиям поглощения кислорода и водяного пара), наиболее перспективными представляются архитектуры на основе оптической фильтрации и оптических гребенок. Они позволяют создавать компактные, высокочувствительные и информативные гиперспектральные микроволновые радиометры нового поколения, пригодные для установки на малые космические аппараты.

Развитие технологий фотонной интеграции ведет к тому, что в ближайшем будущем можно ожидать появления полностью интегральных радиофотонных приемных трактов, объединяющих на одном чипе все функции от преобразования частоты до многоканального детектирования.

В более отдаленной перспективе, по мере развития технологий когерентных оптических гребенок и интегральной фотоники, можно ожидать появления полностью оптических спектрометров-радиометров, которые будут выполнять как функцию приема и фильтрации, так и функцию аналого-цифрового преобразования непосредственно в оптической области.

Литература

1. Кузнецов А.А., Сахабутдинов А.Ж., Ростокин И.Н. Технологии радиофотоники для радиотехники, сенсорики и микроволновой радиометрии. // Всероссийские открытые Арmandовские чтения «Муром 2025»: Материалы Всероссийской открытой научной конференции и Молодёжной школы - конференции, Муром, 03 - 05 июня 2025 года. - Муром: Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, 2025. - 413 с. С. 21-33 DOI: 10.24412/2304-0297-2025-1-21-33.
2. Щукин Г.Г., Федосеева Е.В., Булкин В.В., Ростокин И.Н. Микроволновая радиометрическая система в задачах прогнозирования опасных атмосферных явлений. // Радиотехника и электроника, 2023, том 68, № 6, с. 598 - 607. DOI: 10.31857/S003384942306013X, EDN: XNBVMZ.
3. Денисенко Е.П. Радиофотонные системы локализации источников микроволнового излучения по углу прихода для беспроводных сенсорных систем контроля и диагностики изделий и природной среды. // Электроника, фотоника и киберфизические системы. 2024. Т4. №2 С. 44 - 60.
4. E.A. Rostokina, G.G. Shchukin, E.V. Fedoseeva, I. Yu. Kholodov, A.Zh. Sahabutdinov Radiophotonic path of intermediate frequency signals of multifrequency microwave radiometric system for remote sensing of the atmosphere. // Proceedings Volume 13168,

Optical Technologies for Telecommunications 2023; 1316803 (2024).
<https://doi.org/10.1117/12.3025469>.

5. O. Morozov, G. Potapov, A. Zh. Sakhabutdinov, et al. Superstructured addressed fiber Bragg structures for differentiation and integration of UWB signal envelopes in microwave photonic systems. // Proceedings Volume 13738, 1373809 (2025)
<https://doi.org/10.1117/12.3070978>.

6. T. Agliullin, A. Zh. Sakhabutdinov, B. Valeev, et al. Combination of fiber optical interferometric structures as a universal approach to sensor development. // Proceedings Volume 13738, 1373808 (2025) <https://doi.org/10.1117/12.3067423>.

7. Ze Li, , Xianmin Zhang, Hao Chi, Shilie Zheng, Xiaofeng Jin, Jianping Yao. A Reconfigurable Microwave Photonic Channelized Receiver Based on Dense Wavelength Division Multiplexing Using an Optical Comb. // Optics Communications, Volume 285, Issue 9, 1 May 2012, Pages 2311-2315.