

**К 85-ЛЕТИЮ
ДМИТРИЯ СЕРГЕЕВИЧА ЛУКИНА**

УДК 621.317.7+528.8

МИКРОВОЛНОВАЯ РАДИОМЕТРИЧЕСКАЯ СИСТЕМА В ЗАДАЧАХ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОПАСНЫХ АТМОСФЕРНЫХ ЯВЛЕНИЙ

© 2023 г. Г. Г. Щукин^{a, b}, Е. В. Федосеева^{a, *}, В. В. Булкин^a, И. Н. Ростокин^a

^a Муромский институт (филиал) Владимирского государственного университета им. А.Г. и Н.Г. Столетовых,
ул. Орловская, 23, Муром, 602264 Российская Федерация

^b Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского,
ул. Ждановская, 13, Санкт-Петербург, 197198 Российская Федерация

*E-mail: elenafedoseeva@yandex.ru

Поступила в редакцию 02.02.2023 г.

После доработки 06.04.2023 г.

Принята к публикации 10.04.2023 г.

Показаны основные направления совершенствования радиометрических СВЧ-систем для решения задач сверхкраткосрочного прогнозирования развития неблагоприятных и опасных атмосферных метеоявлений, состоящие в решении задач компенсации влияния фоновых шумов, цифровой обработке выходных сигналов, включения в состав системы радиофотонных трактов и нейронной сети. Приведены результаты корреляционной обработки данных дистанционного зондирования приземного слоя неоднородной атмосферы в трех частотных диапазонах.

DOI: 10.31857/S003384942306013X, **EDN:** XNBVMZ

ВВЕДЕНИЕ

Микроволновые радиометрические исследования атмосферы основаны на измерении мощности ее собственного радиотеплового излучения. Уровень мощности зависит от физических параметров атмосферы — температуры, влажности, влагосодержания, однородности, динамической изменчивости. Такая зависимость позволяет дать необходимые оценки метеопараметров исследуемой области атмосферы по результатам микроволновых радиометрических измерений. Возможность выполнения измерений в непрерывном режиме при их дистанционном характере определяет перспективность развития и использования микроволновых радиометрических комплексов для создания систем мониторинга состояния атмосферы, что для современных условий наблюдаемых изменений климата является задачей, непосредственно связанной с обеспечением оперативного информирования и предупреждения последствий опасных погодных явлений [1–5].

Современные исследования лаборатории “Радиофизические исследования природных сред” Муромского института базируются на многолетнем опыте создания радиометеорологической аппаратуры для зондирования атмосферы [6]. За предшествующие десятилетия было создано несколько комплексов измерительной аппаратуры, разработаны и экспериментально отработаны схемотехнические решения, методики измерений.

Радиометеорологический комплекс для влажностного зондирования атмосферы с антенной диаметром 2.5 м был выполнен в транспортируемом и стационарном вариантах. Основу комплекса составляли четырехканальные радиометрические приемники модуляционного типа с длинами волн 0.8, 1.35, 1.6 и 3.2 см [7]. Для длин волн 1.35 и 1.6 см использовался один приемник с общим облучателем (входным рупором). Чувствительность радиометров по радиояркостным температурам обеспечивалась на уровне 0.5...1 К.

Стационарная система измерения ослабления радиоволн в осадках включала двухканальную трассовую установку с длинами волн 1.6 и 0.8 см. Длина трассы составляла 170 м. Оценка изменения величины затухания сигнала осуществлялась на уровне не хуже 0.05 дБ [8].

Были разработаны и прошли испытания стационарная и самолетная пассивно-активные радиолокационные системы (ПАРЛС) для служб штормооповещения и предупреждения о возможном обледенении летательных аппаратов [9]. Пассивный канал строился на основе модуляционного радиометра с флуктуационным порогом чувствительности на уровне 0.3 К при постоянной времени $\tau = 1$ с. Дальность обнаружения активного канала в режиме ПАРЛС — 175 км. Развязка каналов обеспечивалась на уровне не менее 160 дБ. При использовании антенны диаметром 3 м метеорологический потенциал активного канала

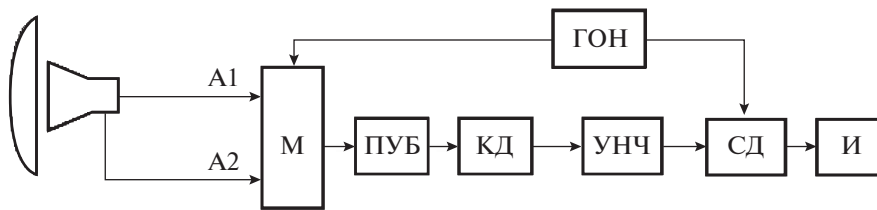


Рис. 1. Схема радиометрической СВЧ-системы с компенсацией фонового излучения: А1 и А2 — основной и дополнительный антенные каналы; М — модулятор; ПУБ — приемно-усилительный блок; КД — квадратичный детектор; СД — синхронный детектор; ГОН — генератор опорного напряжения; И — измеритель-индикатор.

составлял 270 дБ [10], в самолетном варианте при антенне диаметром 0.76 м — 262 дБ [11].

Накопленный практический и методический опыт создания измерительной аппаратуры и проведения мониторинга состояния атмосферы обеспечили переход к новому этапу — созданию современной системы сверхкраткосрочного прогнозирования неблагоприятных и опасных метеоявлений [6, 12–16].

Целью статьи является анализ современного состояния и перспектив построения системы сверхкраткосрочного прогнозирования неблагоприятных и опасных метеоявлений, обсуждение некоторых полученных к настоящему моменту результатов.

1. МЕТОДИЧЕСКИЕ, АППАРАТНЫЕ И ПРОГРАММНЫЕ РЕШЕНИЯ ПО ПОСТРОЕНИЮ СИСТЕМЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОПАСНЫХ МЕТЕОЯВЛЕНИЙ

В процессе реализации программы построения системы прогнозирования опасных атмосферных метеоявлений были наработаны новые методические, программные и аппаратные решения, базирующиеся на имеющихся собственных разработках, обеспечивающие решение задач по совершенствованию радиометрических СВЧ-систем, расширению их функциональных и информативных возможностей [17–20]. Эти решения, часть из которых уже воплощена в виде аппаратно-программных средств, основываются на современных подходах к компенсации помех, применению цифровых методов обработки сигналов, использованию средств и методов радиофотоники, программам обработки данных на основе нейронных сетей [21–23].

Имеющийся в лаборатории опыт создания радиометеорологических комплексов и выполнения микроволновых исследований атмосферы показал необходимость решения задачи снижения влияния фоновых излучений неоднородного окружающего пространства на результаты измерений радиотеплового излучения атмосферы. Такое влияние оказывается достаточно значимым при появлении в

угловой области рассеяния диаграммы направленности антенны насыщенных влагой конвективных облаков при наблюдении в зенит безоблачной части атмосферы, а также при выполнении исследований относительно однородной атмосферы методом угловых разрезов [7, 12, 24]

Наиболее распространенным традиционным способом борьбы с влиянием фонового излучения при исследовании атмосферы в ограниченном угловом секторе является разработка антенн с пониженным уровнем бокового излучения.

Способ компенсации, разработанный и реализованный в исследованиях в Муромском институте, предусматривает формирование дополнительного сигнала на выходе антенны радиометрической СВЧ-системы, который в идеале был бы равен составляющей выходного сигнала основного измерительного антенного канала, формируемого приемом фонового излучения окружающего пространства через область рассеяния диаграммы направленности атмосферы, с получением на выходе системы разностного сигнала, пропорционального радиотепловой мощности излучения атмосферы, соответствующей угловой области главного лепестка диаграммы направленности (ДН) антенны [19, 20]. Была разработана схема радиометрической СВЧ-системы, реализующая такой подход к задаче компенсации влияния фонового излучения (рис. 1) [18, 20].

Следующий этап в развитии направления разработки радиометрических СВЧ-систем с компенсацией фоновых излучений связан с переходом к использованию двухмодового режима работы облучателя антенны — мод H_{11} и E_{01} круглого волновода с их разделением в модовом разделителе [25]. Сформированные ДН на этих модах отвечают требованиям к основному и дополнительному антенным каналам радиометрической СВЧ-системы с компенсацией фоновых излучений. На рис. 2а, 2б показаны расчетная и экспериментальная характеристики направленности облучателя зеркальной антенны для диапазона частот 3.2 см (диаметр раскрыва рупора 10.5 см, диаметр питающего волновода 3.2 см). Для получения экспериментальной характеристики антенны в качестве источника сиг-

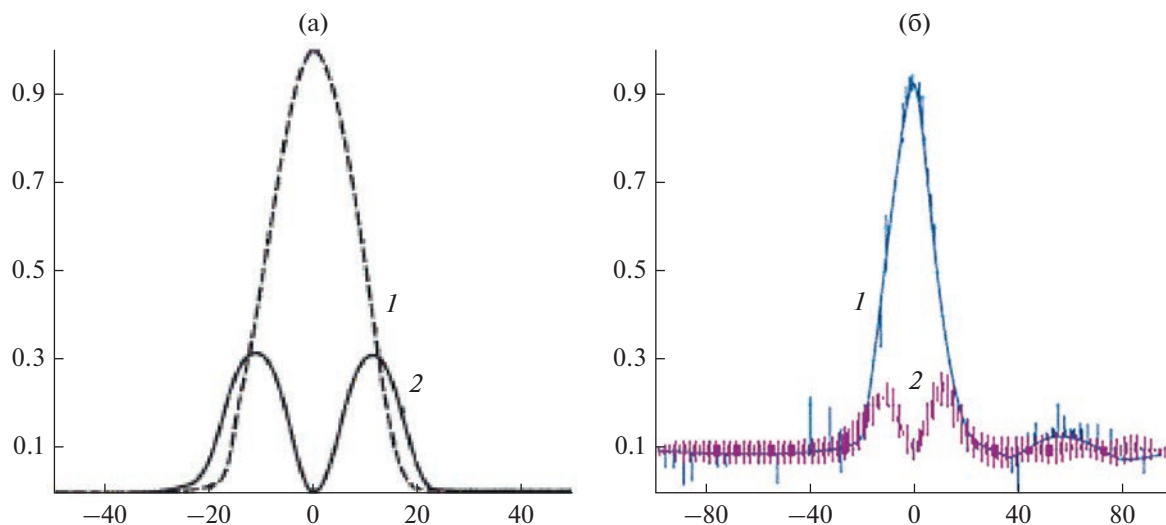


Рис. 2. Расчетная (а) и экспериментальная (б) характеристики направленности облучателя зеркальной антенны на модах H_{11} (1) и E_{01} (2).

нала применен полупроводниковый генератор шума производства НПП “Исток” М31305-1.

На основе разработанного способа снижения уровня шума антенны и двухмодовой апертурной антенны была разработана конструкция модового разделителя, который представляет собой часть общего фидера облучателя антенны, выполненный на круглом волноводе. Он обеспечивает направленное селективное ответвление сигнала основного измерительного и дополнительного антенных каналов путем введения режекторного фильтра для основной моды H_{11} соответствующего подключения волноводных линий [19, 25].

Экспериментальная проверка данного способа подтвердила правильность технических и методических решений и позволила перейти к многочастотным поляризационным измерениям с последовательным частотным разделением сигналов в модовом разделителе. Был разработан трехсекционный модовый разделитель для трехдиапазонной радиометрической СВЧ-системы, с приемом сигнала в диапазонах частот с центральными частотами 3.5, 11 и 22 ГГц. Конструкция модового разделителя позволила обеспечить последовательное выделение сигналов соответствующих частотных диапазонов для двух основных измерительных каналов с вертикальной и горизонтальной поляризациями и дополнительного канала, а также формирования сигнала компенсации, при выполнении измерений по одному осевому направлению [25]. На рис. 3 представлены схема и конструкция трехдиапазонного модового разделителя радиометрической СВЧ-системы с компенсацией фонового излучения.

Переход к многочастотному зондированию атмосферы повышает информативность измерений,

что обусловлено частотной зависимостью как мощности собственного радиотеплового излучения атмосферы, так и ослабления проходящего излучения. Это важно для решения задачи оперативного выявления опасных атмосферных явлений по результатам сравнительного анализа данных измерений в разных частотных диапазонах. Выполнение измерений при разных зенитных углах расширяет возможности их дистанционного структурного анализа.

На рис. 4 приведена схема трехдиапазонной радиометрической СВЧ-системы с формированием в каждом канале дополнительного сигнала компенсации [26].

Трехдиапазонная радиометрическая СВЧ-система с компенсацией фоновых шумов реализована в двух вариантах: мобильном (для полевых исследований) и стационарном (с антенной на здании Муромского института). Внешний вид систем представлен на рис. 5.

Для решения задач регистрации и сбора данных, а также получения разностных сигналов при выполнении компенсации влияния фонового излучения в системе реализовано цифровое преобразование выходных сигналов с формированием массивов данных измерений по всем каналам в отдельности. Для этого в системе предусмотрено использование аналого-цифрового преобразователя (АЦП) с подключением к персональному компьютеру и разработан функционально законченный интерфейс [27].

Пример записи выходных сигналов системы приведен на рис. 6. В данном случае на экран компьютера одновременно выведены временные записи выходных сигналов трех диапазонов радиометрической СВЧ-системы. Такой режим визуализации

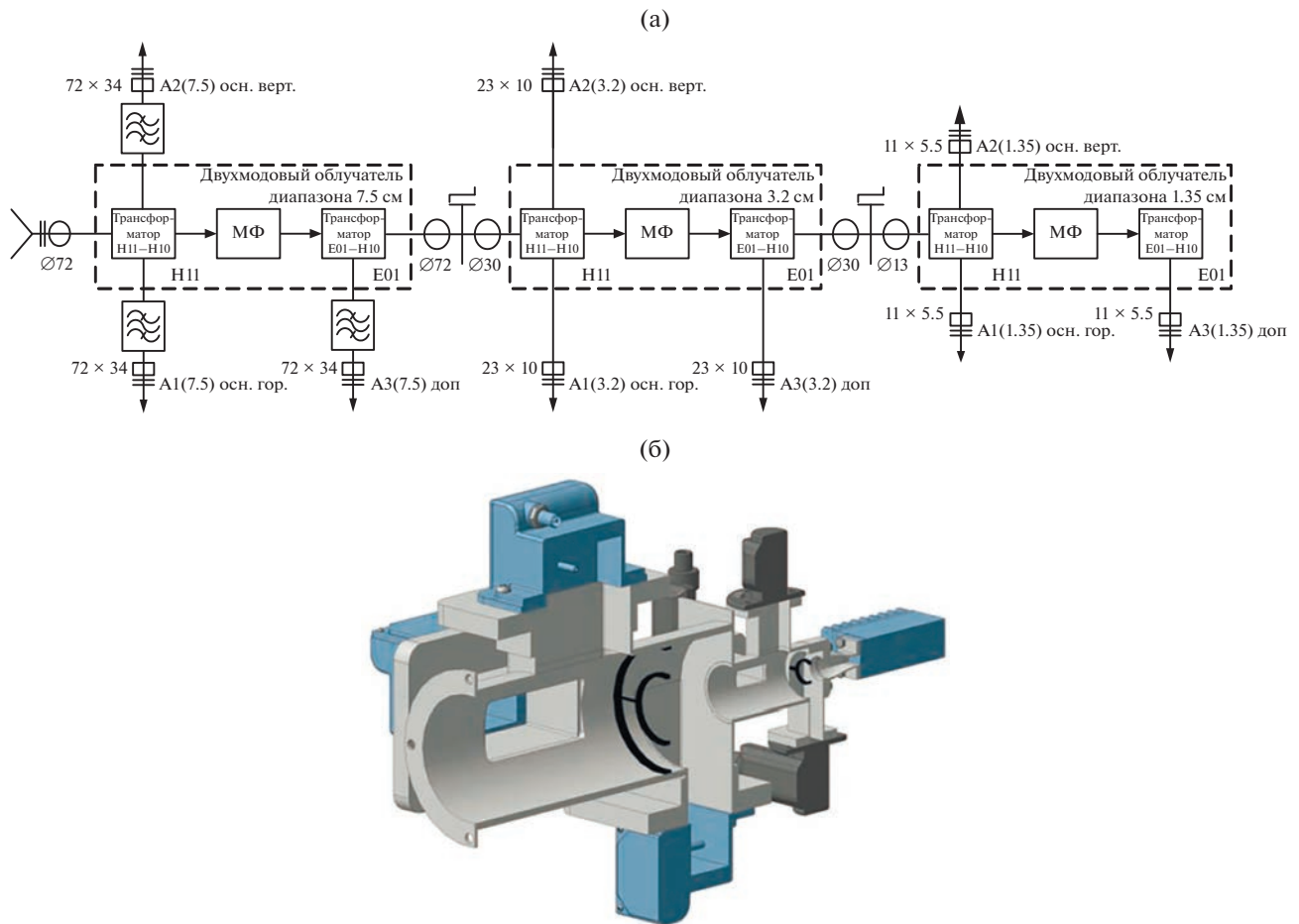


Рис. 3. Модульный разделитель: схема (а) и конструкция (б); А1...А3 — антенные каналы (основной и дополнительный, с вертикальной и горизонтальной поляризацией, при $\lambda = 7.5, 3.2$ и 1.35 см); МФ — модульный фильтр.

зации позволяет качественно оценить зависимость уровня мощности собственного излучения атмосферы при различных метеоусловиях в зависимости от частоты.

Введение цифровых методов регистрации и обработки сигналов позволило решить следующие задачи:

- формирование архива результатов радиометрических СВЧ-измерений атмосферы с параллельным формированием массива данных метеопараметров атмосферы приземного слоя;
- получение результатов разностных измерений при выполнении компенсации влияния фоновых излучений;
- выполнение корреляционного анализа результатов многочастотных радиометрических СВЧ-измерений и метеоданных приземного слоя атмосферы в области выполнения измерений;
- решение задач повышения чувствительности системы при реализации адаптивного накопления сигнала.

2. НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

В течение 2019–2022 годов проводились измерения микроволнового излучения атмосферы с помощью рассмотренной радиометрической СВЧ-системы при больших зенитных углах визирования. Были получены и сохранены суточные временные записи выходных сигналов системы. Отобраны массивы данных, соответствующие дням с выпадением осадков и выполнен корреляционный анализ результатов измерений и метеопараметров приземного слоя атмосферы [28]. Полученные данные показали достаточно сильную корреляционную зависимость величины выходного сигнала с метеопараметрами приземного слоя атмосферы в пределах 200-километровой зоны вокруг линии визирования. В табл. 1 приведены значения коэффициентов корреляции выходных сигналов системы и значений метеопараметров приземного слоя атмосферы для ближайшего и наиболее удаленного города из рассмотренных от места базирования СВЧ радиометрического из-

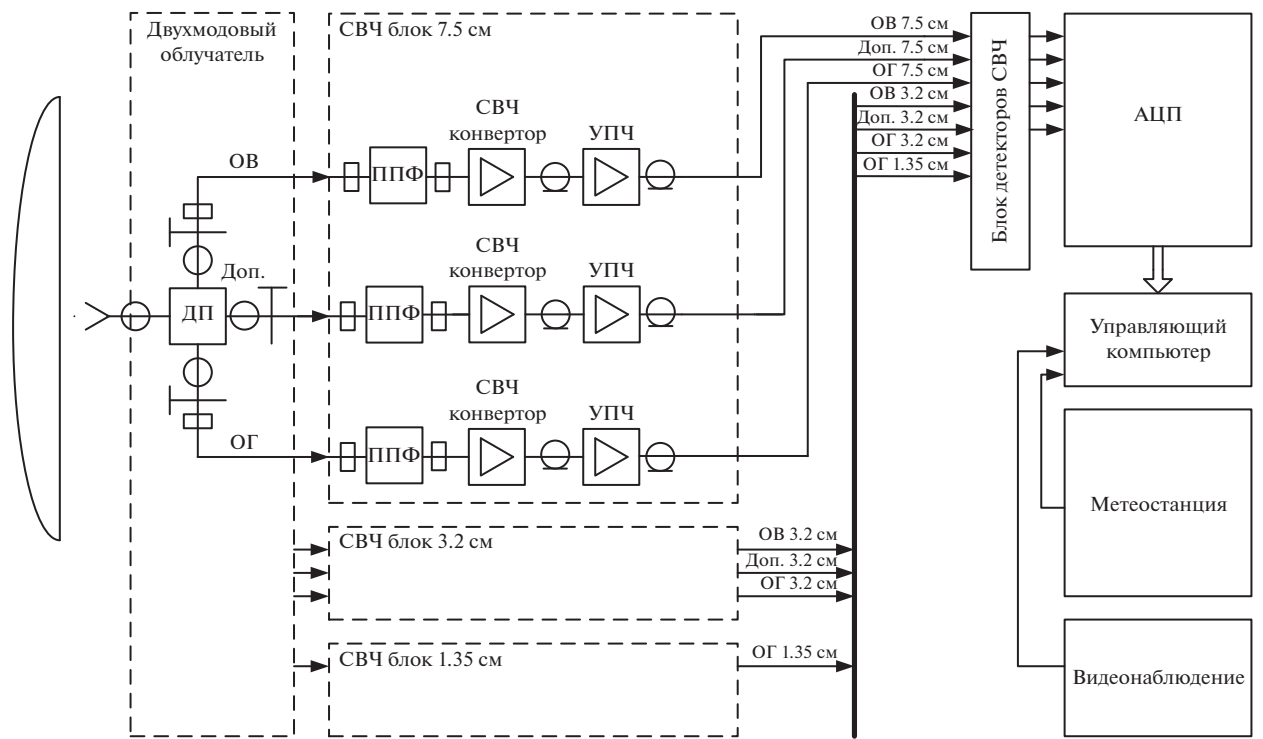


Рис. 4. Структурная схема трехдиапазонной радиометрической СВЧ-системы; ДО – двухмодовый облучатель; ППФ – волноводный полосно-пропускающий фильтр; УПЧ – усилитель промежуточной частоты; КД – многоканальный квадратичный детектор; АЦП – аналогово-цифровой преобразователь; ПК – персональный компьютер для сбора, хранения и обработки данных, ОГ и ОВ – сигнал основного измерительного канала горизонтальной и вертикальной поляризации; доп – сигнал дополнительного измерительного канала.

мерительного комплекса – Муром и Рязани – для двух вариантов формирования выходных сигналов: без компенсации и с компенсацией фоновых шумов. Результаты показали в основном рост величины коэффициента корреляции при выполнении компенсации фоновых шумов.

Цифровой способ формирования выходных сигналов позволил реализовать обработку результатов измерений с различным временем накопления сигнала для решения задачи повышения чувствительности системы. Были выполнены расчеты с изменением времени накопления. На рис. 7

Таблица 1. Коэффициенты корреляции выходных сигналов трехдиапазонной радиометрической СВЧ-системы и значений метеопараметров приземного слоя атмосферы

λ , см / поляризация		Муром			Рязань		
		T , °C	B , %	I , мм/ч	T , °C	B , %	I , мм/ч
Без компенсации фоновых шумов							
7.5	г	0.276	0.579	0.667	0.254	−0.386	0.128
	в	−0.729	−0.094	−0.575	−0.723	0.763	−0.131
3.2	г	−0.789	0.340	−0.346	−0.717	0.631	0.300
	в	−0.803	0.321	−0.370	−0.731	0.650	0.270
1.35	г	0.035	−0.439	−0.211	0.090	0.09	−0.217
С компенсацией фоновых шумов							
7.5	г	0.430	0.316	0.945	0.647	−0.773	0.248
	в	0.525	0.326	0.923	0.679	−0.808	0.313
3.2	г	−0.770	0.33	−0.234	−0.686	0.601	0.259
	в	−0.777	0.299	−0.289	−0.639	0.610	0.196

Примечание: г – горизонтальная поляризация, в – вертикальная; В – влажность, И – интенсивность дождя.

(a)



(б)

(в)



Рис. 5. Трехдиапазонная радиометрическая СВЧ-система; (а) мобильный вариант: 1 – антенная колонка; 2 – антенна; 3 – радиометрическая система; 4 – поворотное устройство; 5 – метеостанция; 6 – элементы блоков управления и обработки информации; 7 – электрогенератор; (б) стационарный вариант: 1 – прямофокусное зеркало диаметром 2400 мм; 2 – многоканальный двухмодовый облучатель со снятой метеозащитой; 3 – многочастотный волноводный микроволновый калибратор; 4 – угломестный привод; 5 – азимутальный привод; (в) антенна в увеличенном масштабе: канал 7.5 см вертикальной (I) и горизонтальной поляризации (I') и дополнительный (I''); канал 3.2 см вертикальной (2) и горизонтальной поляризации (2') и дополнительный (2''); канал 1.35 см горизонтальной поляризации (3).

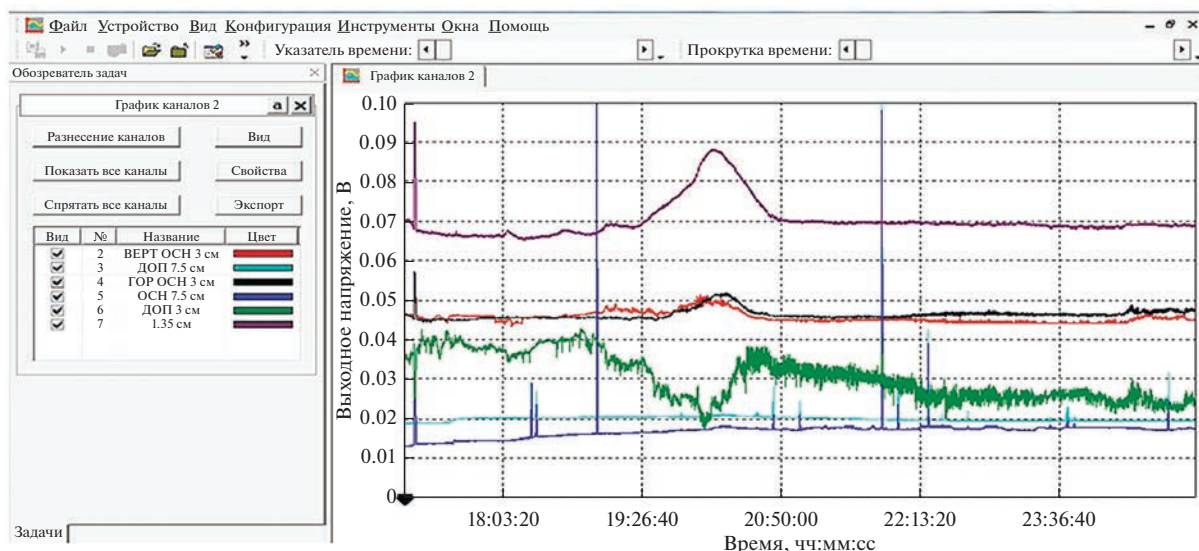


Рис. 6. Интерфейс системы сбора и регистрации данных измерений трехдиапазонной радиометрической СВЧ-системы (скриншот).

показаны временные зависимости выходных сигналов трех диапазонов для времени накопления 0.1 и 20 с [29].

Анализ полученных результатов показал, что для канала с частотой 22 ГГц увеличение времени накопления до 20 с оказалось предельным с позиции отслеживания временных изменений сигнала, так как в определенные моменты небольшие изменения выходного сигнала слабо проявляются, что может привести к занижению отклика системы на изменение состояния атмосферы, фиксируемое в данном диапазоне. При дальнейшем увеличении τ эффекты усреднения приводят к пропуску большего количества таких резких переходов в сигнале, что в конечном итоге может привести к неправильной оценке метеорологической ситуации в условиях быстроразвивающихся атмосферных процессов.

Таким образом, была показана принципиальная возможность повышения чувствительности радиометрических СВЧ-измерений при увеличении времени накопления выходных сигналов при введении ограничений, обусловленных скоростью изменения выходного сигнала при наличии в зондируемой области быстроразвивающихся атмосферных процессов. Выполнение данной процедуры — изменения времени накопления сигнала при выявлении образования опасного атмосферного явления в исследуемой области атмосферы должно быть регулируемым системой при оценке скорости изменения выходных сигналов при введении интеллектуальной системы управления системы, например, включения нейронной сети в состав системы.

3. ЗАДАЧИ И НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ МИКРОВОЛНОВЫХ РАДИОМЕТРИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ АТМОСФЕРЫ В МУРОМСКОМ ИНСТИТУТЕ

Работы в рамках проекта Российского научного фонда позволили провести материально-техническую и методическую модернизацию комплекса, обеспечивающую решение задач повышения точности, чувствительности, информативности измерений, а также реализации непрерывного режима измерений с формированием базы результатов.

Выполненные исследования позволили определить следующие основные направления развития микроволновой радиометрии в научно-исследовательской лаборатории Муромского института:

- непрерывное зондирование атмосферы при больших зенитных углах с формированием архива результатов измерений для решения задачи оперативной оценки пространственно-структурной однородности атмосферы;

- микроволновое исследование фронтальных атмосферных процессов с формированием информационно-базы и развитием системы оценки состояния атмосферы на основе введения нейронной сети.

При решении задачи снижения потерь входных сигналов в радиометрической СВЧ-системе рассмотрено постепенное введение в ее состав устройств радиофотоники [30]. На данном этапе дана оценка снижения потерь сигнала в фидере при замене коаксиальной линии передачи оптическим каналом с оптоэлектронными преобразователями. Были выполнены измерения (рис. 8), кото-

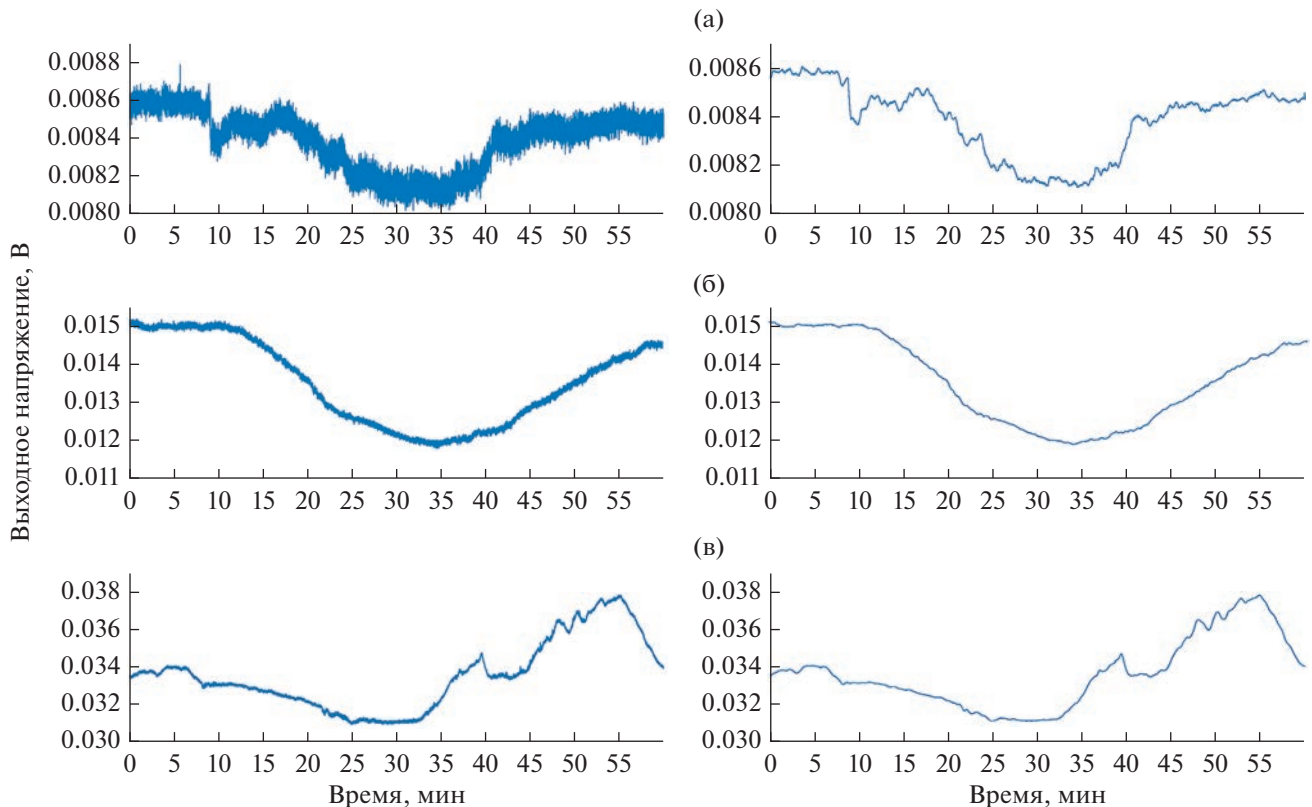


Рис. 7. Временная зависимость выходных сигналов радиометрической СВЧ-системы на частотах 3.5 (а), 10 (б) и 22 ГГц (в) при $\tau = 0.1$ с (слева) и 20 с (справа).

рые показали, что при длине фидера 30 м выигрыш по потерям передачи в оптическом канале по сравнению с радиочастотным трактом равен 10 дБ.

Таким образом, задачи микроволновых радиометрических исследований атмосферы в научно-исследовательской лаборатории Муромского института состоят в следующем:

- включение радиофотоники в состав системы на уровне формирования и обработки выходных сигналов;

- введение в состав системы нейронной сети с решением задач интеллектуального управления временем накопления выходного сигнала, оперативной оценки наличия условий формирования опасных атмосферных явлений в исследуемой области атмосферы, формирования прогнозов развития структурных изменений в атмосфере.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Направление микроволновых радиометрических исследований атмосферы в Муромском институте имеет исторические и методологические основы, базирующиеся на долговременном опыте проектных разработок и натурных измерений.

Современный этап развития направления микроволновых исследований характеризуется реализацией современных принципов приема и обработки сигналов и оригинальных подходов к усовершенствованию радиометрических СВЧ-систем, обусловленных принципом их функционирования – приема широкополосного шумового сигнала с необходимостью реализации его пространственной селекции.

Реализация в многодиапазонной радиометрической СВЧ-системе компенсации влияния фоновых шумов позволила перейти к наклонному зондированию приземного слоя атмосферы при больших углах визирования и решить аппаратные задачи дистанционного зондирования при прогнозировании опасных атмосферных явлений.

Цифровая обработка выходных сигналов радиометрической СВЧ-системы расширила возможности как повышения чувствительности системы, так и расширения вариативности алгоритмов оценки результатов измерений для решения задач прогнозирования при встраивании нейронной сети в состав системы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

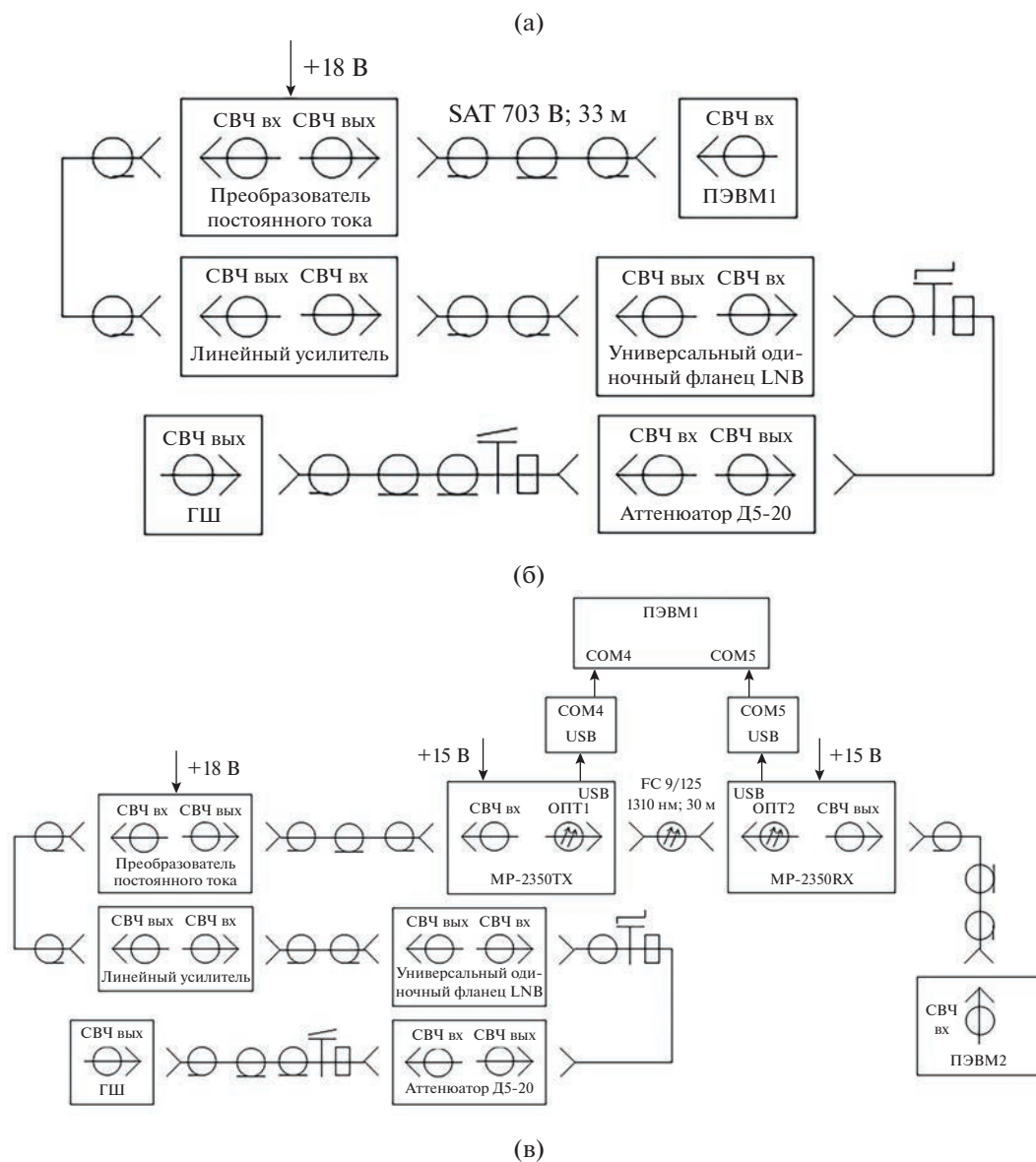


Рис. 8. Структурная схема лабораторного стенда измерения потерь в радиочастотном (а) и радиофотонном тракте (б) промежуточной частоты и внешний вид лабораторного стенда (в).

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 21-19-00378).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Степаненко В.Д., Шукин Г.Г., Бобылев Л.П., Матросов С.Ю. Радиотеплолокация в метеорологии. Л.: Гидрометеиздат, 1987.
2. Кутуза Б.Г., Яковлев О.И., Данилычев М.В. Спутниковый мониторинг Земли: Микроволновая радиометрия атмосферы и поверхности. Монография. М.: Ленанд, 2016.
3. Кадыров Е.Н. Микроволновая радиометрия термической стратификации атмосферы. М., 2020.
4. Cimini D., Nelson M., Guldner J., Ware R. // Atmos. Meas. Tech. 2015. V. 8. P. 315.
5. Westwater E.R., Crewell S., Matzler C. // IEEE Geos. Rem. Sens. Soc. Newsletter. 2005. P. 16.
6. Шукин Г.Г., Булкин В.В., Федосеева Е.В., Ростокин И.Н. // Радиотехн. и телекоммуникац. системы. 2022. № 4. С. 5.
7. Фалин В.В. Радиометрические системы СВЧ. М.: Луч, 1997.
8. Фалин В.В., Костров В.В., Николаев В.А., Гинеотис С.П. // Тез. докл. XIV Всесоюз. конф. по распространению радиоволн. Ленинград, 1984. М.: Наука, 1984. С. 24.
9. Шукин Г.Г., Булкин В.В. // РЭ. 2011. Т. 56. № 5. С. 549.
10. Гинеотис С.П., Фалин В.В., Костров В.В. и др. // Тр. VII Всесоюз. совещ. Радиометеорология. Л.: Гидрометеиздат, 1989. С. 122.
11. Фалин В.В., Первушин Р.В., Шукин Г.Г. и др. // Труды ГГО. 1991. Вып. 535. С. 61.
12. Федосеева Е.В., Шукин Г.Г. Вопросы метрологического обеспечения радиотеплолокационных измерений в условиях действия внешних шумовых помех. Муром: ИИПЦ МИ ВлГУ, 2012.
13. Булкин В.В., Шукин Г.Г., Федосеева Е.В., Ростокин И.Н. // Матер. Всерос. откр. науч. конф. "Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн". Муром: МИ ВлГУ, 2022. С. 7. <https://doi.org/10.24412/2304-0297-2022-1-7-20>
14. Шукин Г.Г., Булкин В.В., Федосеева Е.В., Ростокин И.Н. // Радиотехн. и телекоммуникац. системы. 2022. № 2. С. 5. <https://doi.org/10.24412/2221-2574-2022-2-5-19>
15. Шукин Г.Г., Булкин В.В., Федосеева Е.В., Ростокин И.Н. // Радиотехн. и телекоммуникац. системы. 2022. № 3. С. 5. <https://doi.org/10.24412/2221-2574-2022-2-5-19>
16. Булкин В.В. // Радиотехн. и телекоммуникац. системы. 2014. № 1. С. 73.
17. Ростокин И.Н., Федосеева Е.В., Федосеев А.А. // Радиотехн. и телекоммуникац. системы. 2015. № 1. С. 5.
18. Федосеева Е.В., Ростокин И.Н. // Труды ГГО. 2010. Вып. 562. С. 243.
19. Федосеева Е.В., Ростокина Е.А., Ростокин И.Н. Способ снижения уровня шума антенны и двухмодовая апертурная антенна // Пат. РФ на изобр. № 2300831. Оpubл. офиц. бюл. "Изобретения. Полезные модели" № 16 от 10.06.2007.
20. Федосеева Е.В. Радиометрическая система с компенсацией аддитивных внешних фоновых помех // Патент на полезную модель № 91630. Оpubл. офиц. бюл. "Изобретения. Полезные модели" № 5 от 20.02.2010.
21. Ростокин И.Н., Федосеева Е.В., Шукин Г.Г., Ростокина Е.А. // Радиотехн. и телекоммуникац. системы. 2017. № 1. С. 3.
22. Ростокин И.Н., Федосеева Е.В., Ростокина Е.А., Шукин Г.Г. // Тр. Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. Вып. 680. СПб., 2022. С. 291.
23. Каряев В.В., Ростокин И.Н., Федосеева Е.В., Ростокина Е.А. // Радиотехн. и телекоммуникац. системы. 2020. № 4. С. 5.
24. Федосеева Е.В., Шукин Г.Г. // Научный вестник МГТУ ГА. Вып. 186. С. 58.
25. Ростокин И.Н., Федосеева Е.В., Ростокина Е.А. // Вестн. Концерна ВКО "Алмаз-Антей". 2017. № 1. С. 60.
26. Ростокин И.Н., Федосеева Е.В. // Радиотехн. и телекоммуникац. системы. 2015. № 1. С. 2.
27. Ростокин И.Н., Федосеева Е.В., Шукин Г.Г., Ростокина Е.А. // Радиотехн. и телекоммуникац. системы. 2017. № 1. С. 3.
28. Федосеева Е.В., Ростокин И.Н., Шукин Г.Г. // Метеорология и гидрология. 2022. № 12. С. 78.
29. Rostokin I.N., Fedoseeva E.V., Shchukin G.G., Kholodov I.Y. Physics of the Atmosphere, Climatology and Environmental Monitoring / Eds. by Zakinyan A., Zakinyan R. Cham: Springer, 2023. P. 141.
30. Rostokin I.N., Fedoseeva E.V., Rostokina E.A., Shchukin G.G. // J. Phys.: Conf. Ser. 2022. V. 2388. № 1. P. 012087.