

Дистанционное зондирование сред

DOI 10.24412/2221-2574-2022-4-5-18

УДК 551.501

РАДИОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В МУРОМСКОМ ИНСТИТУТЕ: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

Щукин Георгий Георгиевич

доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры технологий и средств геофизического обеспечения ФГБОУ ВО «Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского» МО РФ (ВКА им. А.Ф. Можайского)¹; научный руководитель лаборатории «Радиофизические исследования природных сред» Муромского института (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых»².

E-mail: ggshchukin@mail.ru

Булкин Владислав Венедиктович

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры техносферной безопасности Муромского института (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых»².

E-mail: vvbulkin@mail.ru

Федосеева Елена Валерьевна

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры радиотехники Муромского института (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский Государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых»².

E-mail: elenafedoseeva@yandex.ru

Ростокин Илья Николаевич

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры управления и контроля в технических системах Муромского института (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский Государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых»².

E-mail: rostockin.ilya@yandex.ru

¹Адрес: 197198, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д. 13.

²Адрес: 602264, Российская Федерация, Владимирская обл., г. Муром, ул. Орловская, д. 23.

Аннотация: С началом XXI века в Муромском институте начались работы по восстановлению радиометеорологического комплекса. К настоящему моменту создан трёхдиапазонный комплекс с рабочими длинами волн 1,35 см, 3,2 см, 7,5 см. Каждый из радиометров имеет трёхканальную внутреннюю структуру, включающую основные каналы для измерений на горизонтальной и вертикальной поляризациях, и дополнительный измерительный канал, выходной сигнал которого, в целом, определяется приёмом радиощумового сигнала через область рассеяния диаграммы направленности основного антенного канала. Такое решение обеспечивается применением двухмодовой двухканальной антенны. Техническая реализация системы осуществлена в стационарном, полевом и мобильном вариантах. Полученные по результатам обработки принимаемых сигналов данные позволяют говорить о возможности применения системы для выработки прогностических решений. Ведётся работа по формированию четвёртого измерительного канала с длиной волны 0,8 см. Разработана схема комплекса с использованием устройств и методов радиофотоники, проведена серия экспериментов, подтверждающих возможность улучшения флуктуационной пороговой чувствительности радиометрической системы в целом. Представлено обобщение по результатам двух первых и третьего этапа развития радиометеорологических исследований в Муромском институте ВЛГУ.

Ключевые слова: радиометр, двухмодовая двухканальная антенна, радиотепловое излучение атмосферы, радиофотоника, математическое моделирование.

Введение

В 2022 году Муромскому институту исполнилось 65 лет.

Радиотехническое направление в институте было одним из наиболее развитых с момента получения статуса филиала Всесоюзного заочного машиностроительного института. В существенной части это были работы, связанные с зондированием природных сред. Достигнутые результаты в одном из этих направлений — дистанционном зондировании атмосферы — закономерно привели к тому, что уже 30 лет, начиная с 1992 года, Научный Совет РАН по распространению радиоволн проводит на базе института Всероссийские конференции по проблемам дистанционного зондирования (ныне — Всероссийские открытые Армандовские чтения).

Также 20 лет назад вышел первый номер межвузовского сборника «Методы и устройства передачи и обработки информации», на базе которого 10 лет назад появился журнал «Радиотехнические и телекоммуникационные системы».

История зарождения, достигнутые результаты, современное состояние и перспективы развития радиометеорологического направления в МИ ВлГУ представлены в цикле статей. В [1] был дан общий краткий обзор, в [2, 3] достаточно подробно рассмотрены начало работ и создание радиометеорологического комплекса влажностного зондирования атмосферы, а также создание пассивно-активного радиометеорологического комплекса. В третьей, заключительной статье цикла, рассматривается современное состояние исследований, работа научной лаборатории «Радиофизические исследования природных сред» и перспективы развития направления.

1. Состояние работ в конце XX века

После создания СВЧ-радиометрического комплекса для зондирования атмосферы и пассивно активной системы (ПАРЛС) для структур предупреждения об опасных метеорологиче-

ских явлениях наступил спад в активности работ, обусловленный понятными причинами: начались 90-е годы. Разумеется, работа продолжалась, но по понятным причинам она в основном была сосредоточена не в практической (аппаратной) части, а в теоретической. Разрабатывались новые схемы радиометрических приёмников и ПАРЛС, методы измерения и компенсации помех, калибровки, конструктивные решения отдельных узлов и т.д. Но практическая база для реализации новых идей в значительной степени перестала существовать.

Именно в этот период результаты работ были представлены в виде диссертаций (включая докторскую диссертацию родоначальника радиометеорологического направления в Муромском институте — Валерия Владимировича Фалина) [4]. Обобщение многих теоретических работ было дано также в монографии В.В. Фалина «Радиометрические системы СВЧ» [5].

Среди практически реализованных идей можно отметить создание на основе двухмодовой двухканальной антенны радиотеплолокационной системы с компенсацией фоновых помех [4, 6].

Устройство основывалось на решениях, применяемых при разработке компенсационных методов повышения помехозащищенности различного типа радиосистем связи. С помощью дополнительного антенного канала с меньшей направленностью организуется приём излучения по помехонесущему направлению с последующим решением задач компенсации в приёмнике радиосистемы. С этой целью на фокальной оси зеркала устанавливается дополнительный облучатель таким образом, чтобы уровень приёма по компенсационному каналу превосходил, в любой области углов, исключая главный лепесток ДН, уровень приёма по основному каналу.

В дальнейшем именно это решение послужило основой для формирования современной радиометеорологической системы.

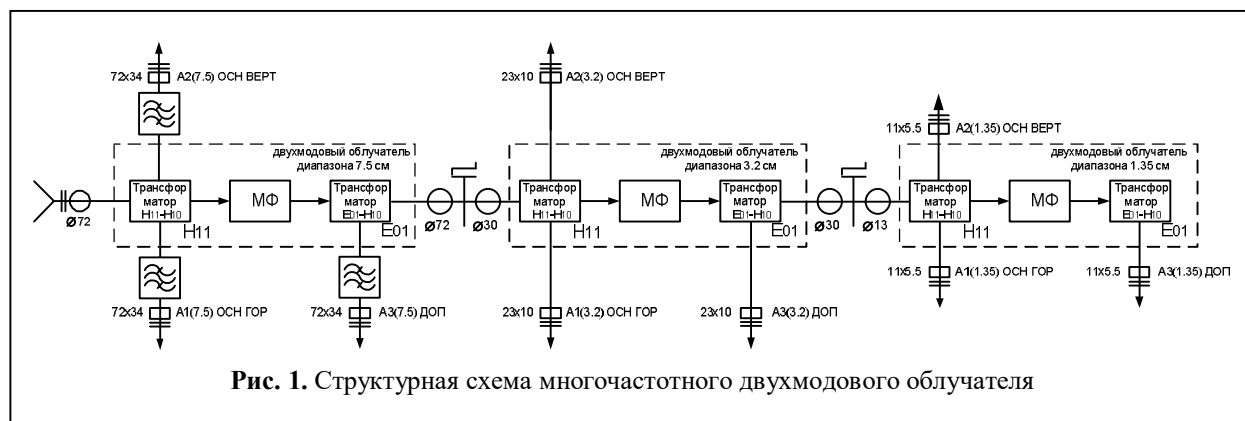


Рис. 1. Структурная схема многочастотного двухмодового облучателя

2. Работы по развитию радиометеорологических исследований в XXI веке

Новый этап в развитии радиометеорологии в МИ ВлГУ начался в XXI веке. К сожалению, к этому моменту не стало В.В. Фалина, фактически перестали существовать ранее созданные комплексы.

После начала постепенного выхода из кризиса 90-х годов стали возобновляться и практические работы по созданию новых систем. К концу 10-х годов в целом была создана база для построения нового радиометеорологического комплекса.

Разработка и развитие нового комплекса осуществлялась на основе разработанной ранее двухмодовой двухканальной антенны.

На первом этапе с использованием современной (на тот момент) элементной базы был восстановлен радиометр с длиной волны $\lambda = 3,2$ см. К настоящему моменту создан трёхканальный комплекс с рабочими длинами волн $\lambda_1 = 1,35$ см, $\lambda_2 = 3,2$ см, $\lambda_3 = 7,5$ см. При этом, каждый из радиометров имеет трёхканальную внутреннюю структуру, включающую основные каналы для измерений на горизонтальной (ГОР) и вертикальной (ВЕРТ) поляризациях, и дополнительный (ДОП) измерительный канал, выходной сигнал которого, в целом, определяется приёмом радиошумового сигнала через область рассеяния ДН основного антенного канала.

Реализация такой трёхдиапазонной системы с внутренним дополнительным разделением на

три канала в каждом частотном диапазоне при работе на общее зеркало антенны определяет условия компенсации влияния фоновых шумов на результаты измерений с возможностью оценки поляризационных контрастов [7].

Модовый разделитель каждого частотного канала (рис. 1) выполнен на основе круглого волновода, к которому подключены три антенные канала (A1 OCH ГОР и A2 OCH ВЕРТ) в совокупности с круглым волноводом являются выходом антенны, осуществляющей приём на волне H_{11} на двух ортогональных поляризациях, а третий антенный канал (A2) — на волне E_{01} .

Широкополосный шумовой сигнал поступает в круглый волновод, в котором возбуждаются волны H_{11} и E_{01} . В трансформаторе типов волн $H_{11} \rightarrow H_{10}$, представляющем собой перпендикулярное подключение волновода, например, прямоугольного, к боковой стенке круглого волновода, в которой имеется прямоугольное окно, широкая стенка которого параллельна оси круглого волновода и размеры которого ограничены размерами поперечного сечения подключённого волновода, осуществляется ответвление энергии, переносимой волной H_{11} , и подача её на выход второго плеча. Структура поля волны E_{01} в перпендикулярном плече в виде прямоугольного волновода не может возбудить волну H_{10} , поскольку соответствующие составляющие вектора E параллельны узкой стенке, одинаковы по амплитуде,

и направлены в противоположные стороны [8, 9].

Режекторный фильтр в виде проводящего кольца в поперечном сечении круглого волновода, препятствует прохождению волны H_{11} и пропускает на вход трансформатора $E_{01} \rightarrow H_{10}$ только энергию, переносимую волной E_{01} . Трансформатор типов волн $E_{01} \rightarrow H_{10}$ представляет, например, перпендикулярное подключение прямоугольного волновода со стороны широкой стенки к круглому волноводу. Таким образом, на выходе трансформатора типов волн $E_{01} \rightarrow H_{10}$ (третий канал АЗ) выделяется сигнал, пропорциональный только энергии волны E_{01} .

С целью обеспечения осевой симметрии ДН на всех диапазонах измерения предусмотрена последовательная частотная селекция сигналов трёх диапазонов в модовом разделителе общего облучателя зеркальной антенны.

Трёхмерная модель двухмодового облучателя трёхдиапазонной микроволновой радиометрической системы, формирующего основные и дополнительные входные сигналы в трёх частотных диапазонах (I — 4 ГГц, II — 10 ГГц, III — 22 ГГц), показана на рис. 2. Для разделения волн H_{11} и E_{01} в каждой из трёх секций ан-

тенного устройства расположены модовые фильтры (МФ) — режекторные кольца.

Структурная схема многочастотной микроволновой радиометрической системы представлена на рис. 3.

На вход блока обработки поступают три входных сигнала, которые при условии абсолютной поляризационной развязки каналов и изотропности радиозумового излучения, принимаемого из области рассеяния ДН основного антенного канала, соответственно равны:

– выходной сигнал основного канала при приёме на горизонтальной поляризации (ОСН–ГОР)

$$U_{\text{осн гор}} \sim k(T_{\text{гл гор}}(1 - \beta)\eta + T_{\text{бок}}\beta\eta + T_0(1 - \eta)) + T_{\text{ш пр}}; \quad (1)$$

– выходной сигнал основного канала при приёме на вертикальной поляризации (ОСН–ВЕРТ)

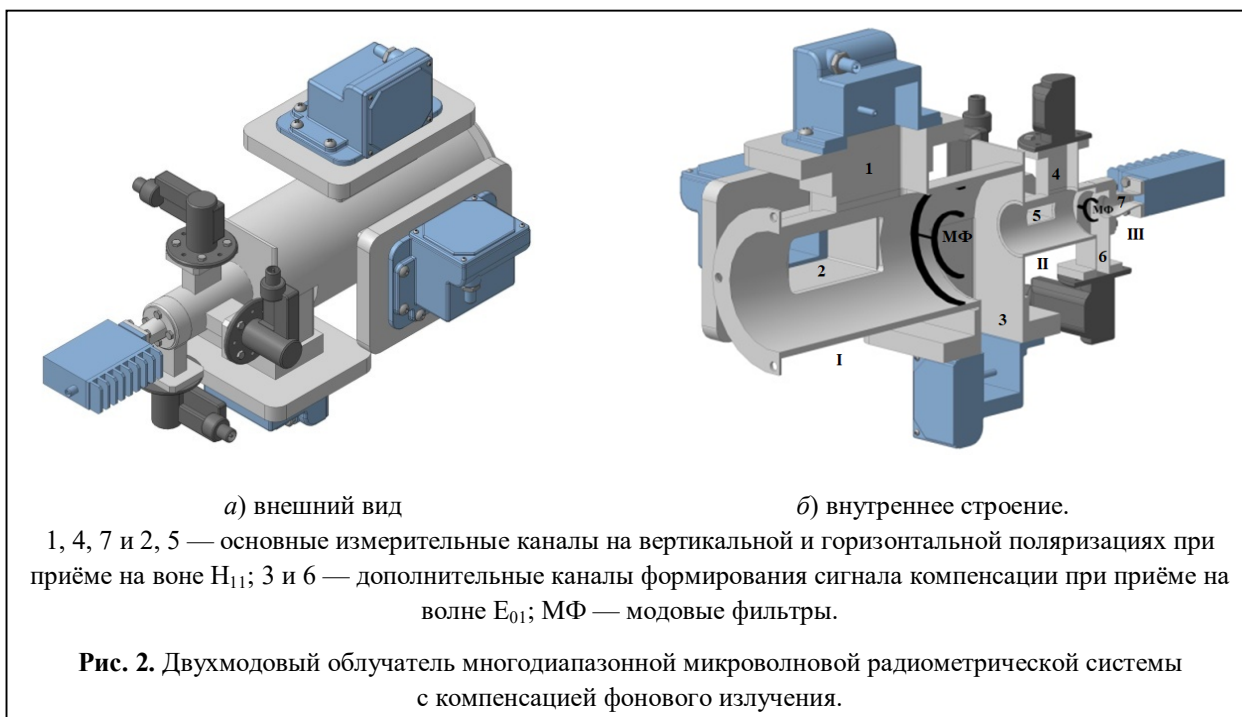
$$U_{\text{осн верт}} \sim k(T_{\text{гл верт}}(1 - \beta)\eta + T_{\text{бок}}\beta\eta + T_0(1 - \eta)) + T_{\text{ш пр}}; \quad (2)$$

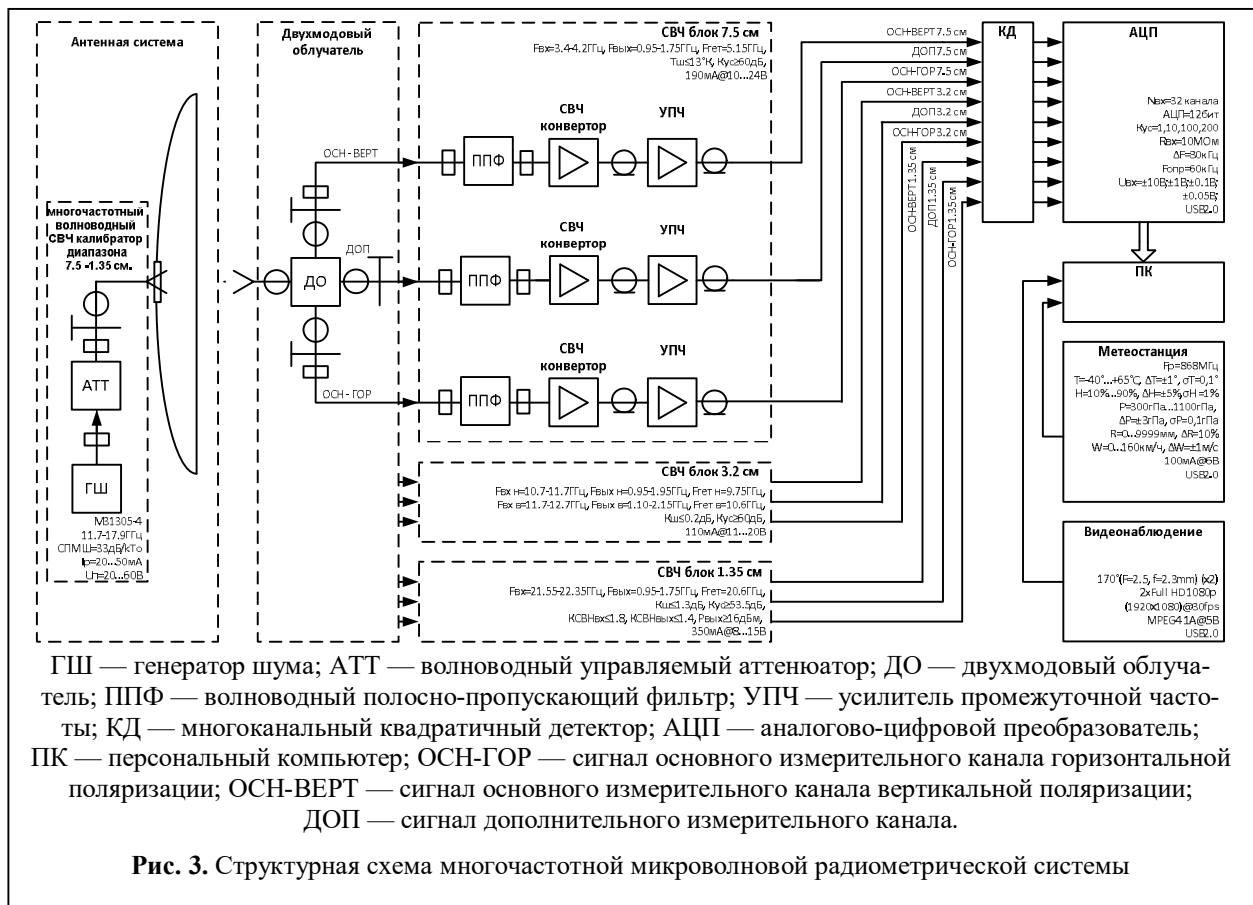
– выходной сигнал дополнительного канала (ДОП)

$$U_{\text{доп}} \sim k(T_{\text{бок}}\beta\eta + T_0(1 - \eta)) + T_{\text{ш пр}}. \quad (3)$$

На выходе блока обработки формируются два разностных сигнала

$$U_{\text{вых гор}} = U_{\text{осн гор}} - U_{\text{доп}} \sim kT_{\text{гл гор}}(1 - \beta)\eta, \quad (4)$$





$U_{\text{вых верт}} = U_{\text{осн верт}} - U_{\text{доп}} \sim kT_{\text{гл верт}}(1 - \beta)\eta$, (5)
 где β — коэффициент рассеяния антенны; $T_{\text{гл}}$, $T_{\text{бок}}$ — радиояркость температуры среды, соответственно, в области главного лепестка и в области рассеяния ДН; η — КПД антенны; T_0 — термодинамическая температура антенны; $T_{\text{шпр}}$ — шумовая температура радиометра; k — коэффициент передачи радиометра входных сигналов антенны.

Согласно выражениям (4) и (5) при абсолютном выполнении требований к поляризационной развязке каналов и к направленным свойствам дополнительного антенного канала в выходных сигналах радиометрической системы отсутствуют составляющие, обусловленные собственными шумами радиометра и приёмом фонового шума через область рассеяния ДН антенны.

При условии конечной поляризационной развязки между основными каналами ортогональных линейных поляризаций, характеризуемой коэффициентом взаимной передачи

$k_{\text{пр}}$, выходные сигналы определяются выражениями

$$U_{\text{вых гор}} = U_{\text{осн гор}} - U_{\text{доп}} \sim k(T_{\text{гл гор}} + k_{\text{пр}}T_{\text{гл верт}})(1 - \beta)\eta, \quad (6)$$

$$U_{\text{вых верт}} = U_{\text{осн верт}} - U_{\text{доп}} \sim k(T_{\text{гл верт}} + k_{\text{пр}}T_{\text{гл гор}})(1 - \beta)\eta, \quad (7)$$

а разностный сигнал оценки поляризационного контраста равен

$$\Delta U_{\text{пр вых}} = U_{\text{осн гор}} - U_{\text{вых верт}} \sim k(1 - k_{\text{пр}}) \times (T_{\text{гл верт}} + T_{\text{гл гор}})(1 - \beta)\eta. \quad (8)$$

Измерение поляризационных характеристик радиотеплового излучения гидрометеоров составляет основу дистанционного определения интенсивности осадков, параметров распределения капель дождя по размерам и параметров пространственной структуры дождя.

Результаты математического моделирования показали, что компенсация фонового излучения, принимаемого по основному антенному каналу, может быть проведена с высокой степенью точности порядка сотых долей яркостных температур по каждому угловому

Таблица 1 – Параметры многодиапазонной микроволновой радиометрической системы.

| Параметр | Значение | | |
|---|----------|------|------|
| 1. Длина волны, λ , см. | 7,5 | 3,2 | 1,35 |
| 2. Радиометрическая чувствительность ΔT , при постоянной времени интегрирования $\tau = 1$ с, °К. | 0,03 | 0,04 | 0,05 |
| 3. Полоса пропускания, Δf , МГц. | 800 | 1000 | 800 |
| 4. Шумовая температура приёмника, $T_{шпр}$, °К | 13 | 13 | 101 |
| 5. Коэффициент усиления приёмника, G , дБ. | 60 | 60 | 53 |
| Мобильный вариант, антенна $D = 1000$ мм, $F = 320$ мм | | | |
| 6. Ширина диаграммы направленности по уровню -3 дБ | 5,07 | 1,82 | 0,91 |
| 7. Коэффициент усиления антенны, $K_{ус}$, дБ. | 31 | 40 | 46 |
| Стационарный полевой вариант, антенна $D = 2400$ мм, $F = 900$ мм | | | |
| 8. Ширина диаграммы направленности по уровню -3 дБ | 2,13 | 0,76 | 0,38 |
| 9. Коэффициент усиления антенны, $K_{ус}$, дБ. | 39 | 48 | 54 |

направлению, причём по дальним боковым направлениям точность компенсации выше [10, 11, 12, 13].

Основные технические характеристики микроволнового комплекса приведены в таблице 1.

К настоящему моменту техническая реализация разработанной многочастотной микроволновой радиометрической системы дистанционного зондирования атмосферы осуществлена в стационарном, стационарном полевом и мобильном вариантах. Позиция многодиапазонной микроволновой радиометрической системы в стационарном варианте с зеркалом 2,5 м на крыше главного корпуса МИ ВлГУ показана на рис. 4, внешний вид одного из промежуточных вариантов многодиапазонного двухмодового облучателя со снятой метеозащитой, установленного в фокусе антенны, показан на рис. 5. Полевой стационарный вариант собран с лепестковым зеркалом диаметром 2,4 м и установлен на уровне земли в сельской местности. Мобильный вариант показан на рис. 6.

Многодиапазонный двухмодовый облучатель в варианте трёх волн и трёх каналов в каждом диапазоне показан на рис. 7.

Также была проведена разработка системы сбора и обработки данных многочастотной микроволновой радиометрической системы, позволяющая выполнять автоматическую об-

работку радиометрических данных путём перехода от аналоговой к цифровой форме решения задач компенсации влияния фонового излучения с выходом на уровень программной реализации [14]. С её помощью решаются следующие основные задачи:

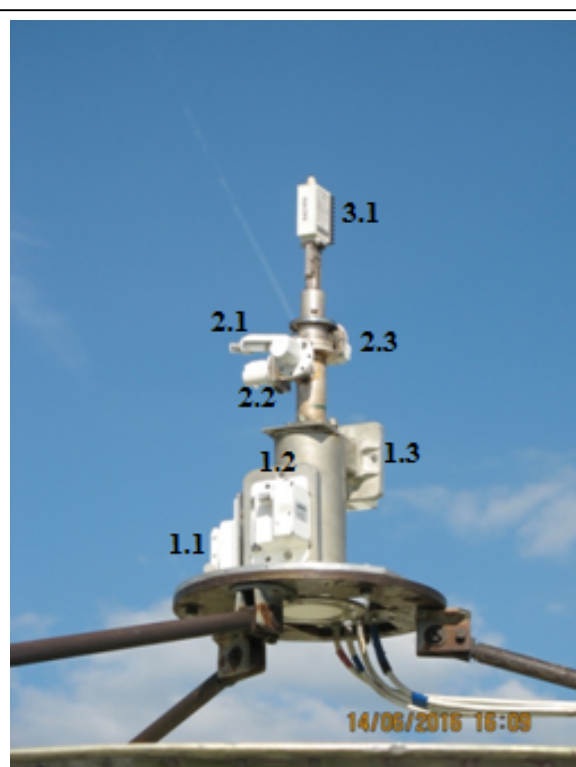
- оценка интенсивности радиотеплового излучения атмосферы по среднеквадратической величине шумов принимаемых сигналов;
- оцифровка данных измерений, получаемых от многочастотной микроволновой радиометрической системы;
- экспорт получаемых данных в файлы различных форматов для последующей обработки и решения обратных задач;
- программная реализация процедуры обработки данных предусмотренной алгоритмом нахождения разности компенсации фоновых шумов;
- перевод уровня выходных сигналов измерительной системы в величины радиояркостных температур;
- реализация модели оценки метеорологических параметров атмосферы по результатам дистанционных многочастотных микроволновых радиометрических измерений.

Радиотепловое излучение атмосферы с помощью антенной системы преобразуется в антенную температуру. После необходимого усиления принятого сигнала (порядка 60 дБ) на высокой частоте (4 ГГц, 10 ГГц, 22 ГГц)



- 1 — Прямофокусное зеркало диаметром 2400 мм;
 2 — Многоканальный двухмодовый облучатель со снятой метеозащитой; 3 — Многочастотный волноводный микроволновый калибратор;
 4 — Угломестный привод; 5 — Азимутальный привод.

Рис. 4. Антенная система современного комплекса



- 1.1 — Канал 7,5 см ВЕРТ поляризации;
 1.2 — Канал 7,5 см ГОР поляризации;
 1.3 — ДОП канал 7,5 см компенсации;
 2.1 — Канал 3,2 см ВЕРТ поляризации;
 2.2 — Канал 3,2 см ГОР поляризации;
 2.3 — ДОП канал 3,2 см компенсации;
 3.1 — Канал 1,35 см ГОР поляризации.

Рис. 5. Облучатель без метеозащиты



- 1 — Антенная колонка; 2 — Антенна; 3 — Радиометрическая система; 4 — Поворотное устройство;
 5 — Метеостанция; 6 — Элементы блоков управления и обработки информации; 7 — Электрогенератор

Рис. 6. Мобильный вариант системы



Рис. 7. Многодиапазонный двухмодовый облучатель

каждого микроволнового измерительного канала, преобразования на промежуточную частоту (порядка 1 ГГц) и квадратичного детектирования, сигналы с выходов микроволновых радиометров поступают на входы системы сбора и обработки данных.

Из результатов измерений в трёх частотных диапазонах по семи каналам — величин выходных напряжений квадратичных детекторов с опросом АЦП с периодичностью 0,1 с — формируются массивы данных для последующей обработки информации.

3. Некоторые результаты исследований

Среди проведённых измерений можно показать результаты анализа продолжительных (суточных) изменений мощности радиотеплового излучения атмосферы при наличии удаленных зон дождя в апреле 2020 г. Измерения выполнялись для направления антенны, соответствующего углу места 30° при базировании радиометрической системы в Муромском районе Владимирской области и при наличии горизонтально неоднородной атмосферы [15].

Результаты измерений приведены на рис. 8–10. Вертикальными линиями заданы моменты времени максимального прироста выходных сигналов. Во всех случаях прослеживается тенденция более раннего по времени наблюдения прироста выходного сигнала на

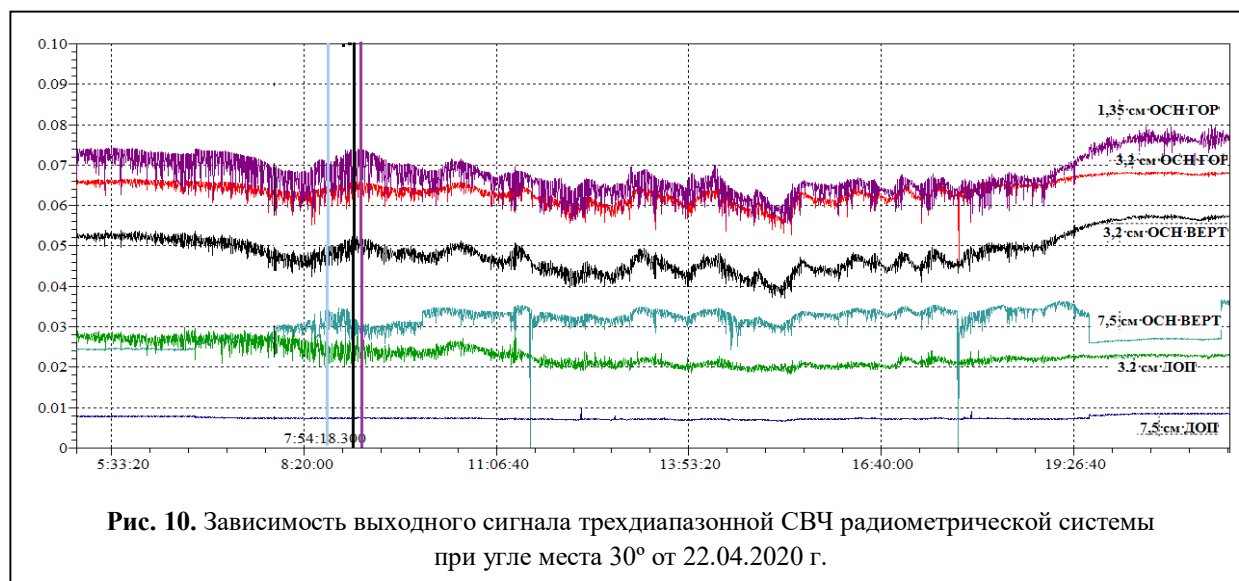
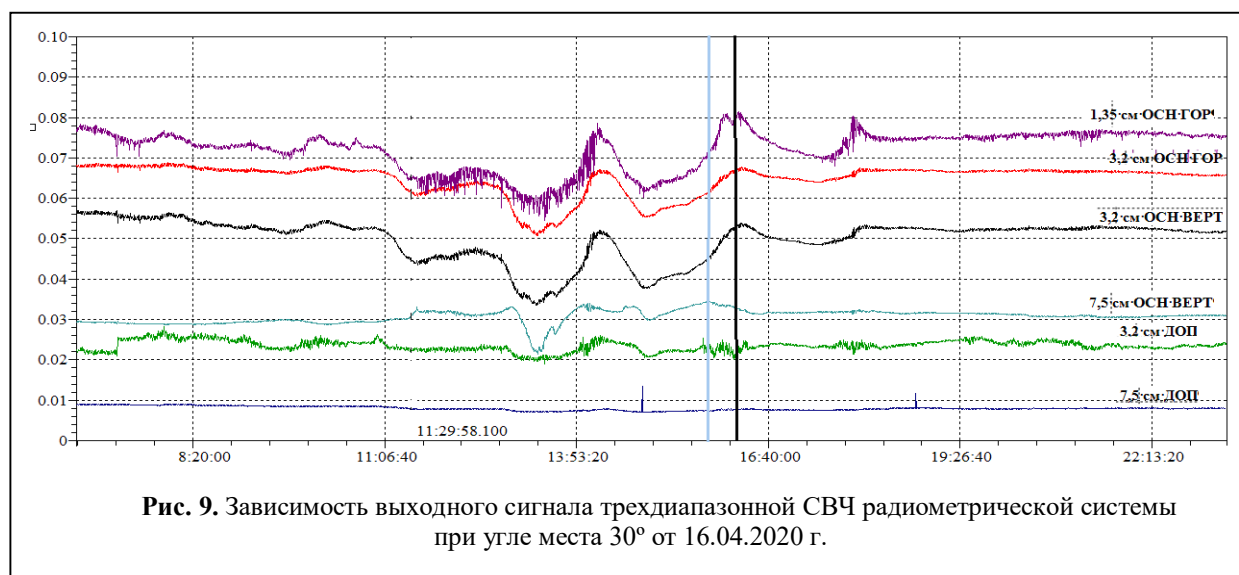
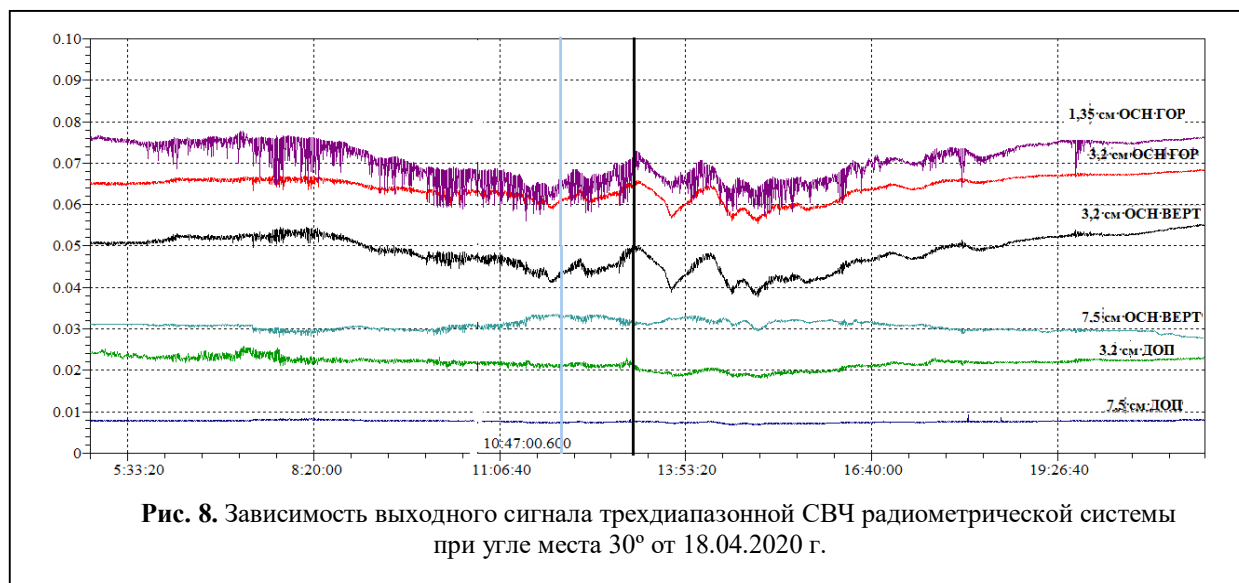
длине волны 7,5 см, чем на длинах волн 3,2 см и 1,35 см.

Имеет место определённое отличие ожидаемых результатов зондирования от полученных при численных расчётах радиояркостной температуры атмосферы с удалённой областью дождя, что может быть обусловлено ненулевой шириной ДН антенны.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о возможности формирования оперативных прогнозов приближения области дождя с оперативным его отслеживанием по данным многочастных микроволновых радиометрических измерений.

4. Перспективы развития системы

Решение Армандовских чтений 2019 года определило необходимым и перспективным создание комплексной региональной системы сверхкраткосрочного прогнозирования развития неблагоприятных и опасных атмосферных метеоявлений на базе МИ ВлГУ. В соответствии с этим решением в Муромском институте была организована научно-исследовательская лаборатория «Радиофизические исследования природных сред». Научный руководитель лаборатории — д.ф.-м.н., профессор Щукин Г.Г.



В настоящее время ведутся работы по совершенствованию и расширению системы. Так, близится к завершению работы по созданию двухмодового облучателя на четыре длины волны: 0,8; 1,35; 3,2 и 7,5 см. Радиометрическая чувствительность приёмника на $\lambda = 0,8$ см, при постоянном времени интегрирования $\tau = 1$ с, должна быть обеспечена на уровне $0,07^\circ$ К при коэффициенте усиления 50 дБ.

Другим важным направлением развития комплекса является применение методов и элементной базы радиофотоники. В первую очередь речь идёт об использовании радиофотонной волоконно-оптической линии передачи СВЧ сигналов в тракте промежуточной частоты [16].

Вариант структурной схемы радиофотонной многочастотной СВЧ радиометрической системы приведён на рис. 11.

Включение элементов радиофотоники в состав систем дистанционного зондирования позволит снизить потери сигнала при его передаче на оконечные устройства обработки, что в целом способствует повышению чувствительности систем.

Для практической оценки потерь ради шумового сигнала при прохождении радиочастотного и радиофотонного тракта передачи

СВЧ сигналов был проведён ряд измерений с использованием радиофотонного передатчика MP-2350 TX и радиофотонного приёмника MP-2350 RX фирмы «Microwave Photonic Systems, Inc.». Оценке подлежало снижение потерь полезной информации при прохождении радиошумового сигнала от полупроводникового генератора шума на ЛПД М31305-4 по радиофотонному тракту промежуточной частоты (длина 33 м.) передачи СВЧ сигналов в сопоставлении с коаксиальным трактом аналогичной длины. Полученные данные свидетельствуют о значительном улучшении характеристик тракта передачи сигнала промежуточной частоты СВЧ радиометрической системы на основе радиофотонной приёмопередающей аппаратуры, что в конечном итоге приведёт к улучшению флуктуационной пороговой чувствительности радиометрической системы в целом.

5. Итоги третьего этапа работ

Современное состояние дел в части развития методов и средств радиотеплолокационного зондирования атмосферы в значительной степени определяется наличием специализированной научно-исследовательской лаборатории «Радиофизические исследования природных сред». Её создание, а также получение не-

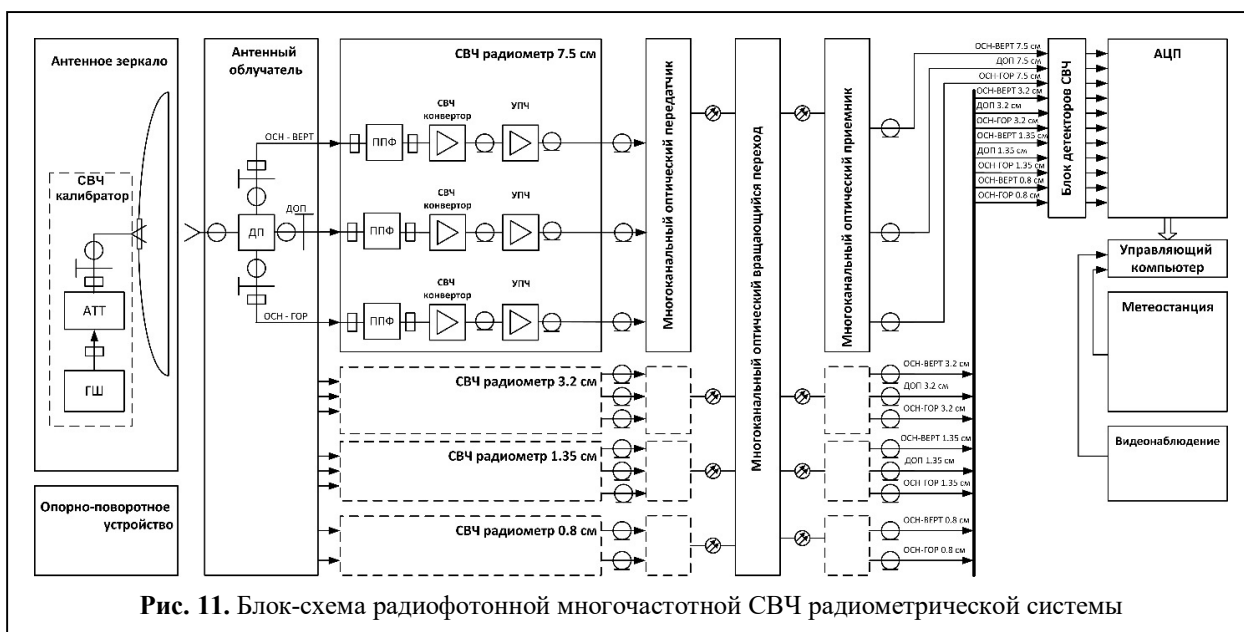


Рис. 11. Блок-схема радиофотонной многочастотной СВЧ радиометрической системы

скольких грантов РФФИ и РНФ обеспечили возможность создания и развития системы радиометеорологического назначения. Имеющаяся к настоящему времени система обеспечивает возможность измерений в трёхдиапазонном режиме на двух поляризациях. Обеспечена компенсация помеховых излучений, неизбежных в силу неидеальности ДН антенн. На основе нейронной сети была разработана и успешно используется система обработки сигналов.

Полученные по результатам обработки принимаемых сигналов данные позволяют говорить о возможности применения системы для выработки прогностических решений, например — в службах штормооповещения.

Ведётся работа по формированию четвёртого измерительного канала с длиной волны 0,8 см. Разработана схема комплекса с использованием устройств и методов радиофотоники, проведена серия экспериментов, подтверждающих возможность улучшения флуктуационной пороговой чувствительности радиометрической системы в целом.

Работы в Муромском институте по созданию многдиапазонной микроволновой радиометрической системы ведутся под руководством Г.Г. Шукина. Наибольший вклад в создание этих систем внесли Е.В. Федосеева, И.Н. Ростокин, Е.А. Ростокина. В работах принимают участие Ечин П.А., Холодов И.Ю., Матюков М.А., Каряев В.В., Тышкевич Е.С., Романов А.С., Трошина Е.Н. и другие.

Заключение

За эти несколько десятилетий научное направление дистанционного радиометеорологического зондирования атмосферы, начатое В.В. Фалиным, пережив разные этапы, выросло и окрепло. Создано несколько комплексов радиометеорологической аппаратуры. Часть из них представлена в этом цикле статей, часть осталась «за бортом» рассмотрения. Созданная аппаратура прошла испытания как в стационарных вариантах, так и в полевых или экспедиционных условиях.

Среди параметров оценки эффективности каких-либо научных работ не последнее место занимают такие показатели, как количество и качество научных публикаций, количество подготовленных и защищённых диссертаций.

Сложно в коротком обзоре дать оценку числу опубликованных статей или материалов докладов. Можно отметить, что было опубликовано несколько монографий, получено несколько десятков Авторских свидетельств и Патентов.

Что касается количества подготовленных диссертаций, то за весь период работы в данном направлении были защищены: кандидатские диссертации — В.В. Фалиным, Л.П. Соловьёвым, В.И. Гореликовым, С.П. Гинеотисом, В.В. Булкиным, Е.В. Федосеевой, Е.А. Ростоквиной, И.Н. Ростоквиным, Р.В. Первушиным; докторские диссертации — В.В. Фалиным, В.В. Булкиным, Е.В. Федосеевой, И.Н. Ростоквиным.

Ещё один итог работ, начатых Валерием Владимировичем Фалиным — совместное проведение Научным Советом РАН по распространению радиоволн и Муромским институтом ВлГУ Всероссийских конференций по проблемам дистанционного зондирования (Всероссийские открытые Армандовские чтения).

В целом итоги работы за эти несколько десятилетий рассмотрены во всех трёх статьях цикла.

*Исследование выполнено при поддержке
гранта Российского научного фонда
№ 21-19-00378
(<https://rscf.ru/projekt/21-19-00378>)*

Литература

1. Булкин В.В., Шукин Г.Г., Федосеева Е.В., Ростокви И.Н. Радиометеорологические исследования в Муромском институте. К 30-летию проведения Армандовских чтений // Всероссийские открытые Армандовские чтения [Электронный ресурс]: Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн / Материалы Всероссийской открытой

научной конференции. Муром: МИ ВлГУ, 2022. С. 7–20. DOI: 10.24412/2304-0297-2022-1-7-20

2. Щукин Г.Г., Булкин В.В., Федосеева Е.В., Ростокин И.Н. Радиометеорологические исследования в Муромском институте: СВЧ-радиометрический комплекс // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2022. №2. С. 5–19. DOI 10.24412/2221-2574-2022-2-5-19.

3. Щукин Г.Г., Булкин В.В., Федосеева Е.В., Ростокин И.Н. Радиометеорологические исследования в Муромском институте: пассивно-активный радиометеорологический комплекс // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2022, №3. С. 5–17. DOI 10.24412/2221-2574-2022-2-5-19.

4. Фалин В.В. Высокоинформативные СВЧ радиометрические системы: диссертация ... доктора технических наук: 05.12.04. Муром, 1998. 460 с.

5. Фалин В.В. Радиометрические системы СВЧ. М.: Луч, 1997. 440 с.

6. Фалин В.В., Федосеева Е.В., Соловьев Л.П. Оптимальный алгоритм построения радиотеплолокационных систем // Радиолокация, радионавигация и связь. IV Международная научно-технической конференции. Тез. докл. Воронеж, 1998. С. 1015–1024.

7. Ростокин И.Н., Федосеева Е.В. Исследование антенного устройства трёхдиапазонной СВЧ-радиометрической системы дистанционного зондирования атмосферы с компенсацией влияния фонового излучения // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2015. №3. С. 94–100.

8. Патент РФ №2300831. Способ снижения уровня шума антенны и двухмодовая апертурная антенна // Федосеева Е.В., Ростокина Е.А., Ростокин И.Н. Оpubл.: 10.06.2007. Бюл. №16

9. Ростокина Е.А. Исследование направленных свойств двухмодовой антенной системы с компенсацией фонового излучения окружающего пространства // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2018. №4. С. 55–60.

10. Федосеева Е.В., Щукин Г.Г. Вопросы метрологического обеспечения радиотеплолокационных измерений в условиях действия внешних шумовых

помех: монография. Муром: ИИПЦ МИ ВлГУ, 2012. 103 с.

11. Rostokin I.N., Karyayev V.V., Fedoseeva E.V., Rostokina E.A., Shchukin G.G. Short-term forecasting of atmospheric meteorological parameters based on the results of the neural network of a three-band microwave radiometric system // Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 1991. 012016. DOI: 10.1088/1742-6596/1991/1/012016.

12. Fedoseeva E.V., Rostokin I.N., Shchukin G.G. Calibration of a tri-band microwave radiometric system with background noise compensation // Measurement Techniques. 2020. Vol. 63. No. 4. Pp. 301–307.

13. Федосеева Е.В., Ростокин И.Н., Щукин Г.Г. Оценка условий приёма в двухканальной СВЧ радиометрической системе по внешнему тестовому сигналу // Известия высших учебных заведений. Физика. 2016. Т. 59. №12/3. С. 117–121.

14. Каряев В.В., Ростокин И.Н., Федосеева Е.В., Ростокина Е.А. Нейронная сеть в СВЧ радиометрической системе мониторинга атмосферы // Радиотехнические и телекоммуникационные системы 2020. №4. С. 5–14.

15. Федосеева Е.В., Ростокин И.Н., Щукин Г.Г., Ростокина Е.А. Многодиапазонное СВЧ радиометрическое зондирование удалённых зон дождя / Всероссийские открытые Армановские чтения [Электронный ресурс]: Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн / Материалы Всероссийской открытой научной конференции. Муром: ИПЦ МИ ВлГУ, 2020. С. 163–168.

16. Морозов О.Г., Морозов Г.А., Ильин Г.И., Нуреев И.И., Сахабутдинов А.Ж., Ростокин И.Н., Мальцев А.В., Иванов А.А., Лустина А.А., Денисенко Е.П., Денисенко П.Е., Андреев В.Д. Программно-аппаратный анализатор спектра для радиофотонных устройств измерения доплеровского сдвига частоты и его знака // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2022. № 1 (53). С. 65–80.

Поступила 20 сентября 2022 г.

English

RADIO-METEOROLOGICAL RESEARCH AT MUROM INSTITUTE: CURRENT STATE AND DEVELOPMENT POTENTIAL

Georgy Georgyevich Shchukin — Grand Dr. in Physics and Mathematics, Professor, Department of Technologies and Army Geophysical Support Federal State-owned Military Educational Institution of Higher Education “Military Space Academy named after A.F. Mozhaysky”¹, Ministry of Defense of the Russian Federation.

E-mail: ggshchukin@mail.ru

Vladislav Venediktovich Bulkin — Grand Dr. in Engineering, Professor, Technosphere Safety Department, Murom Institute (Branch) Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education “Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletovs”².

E-mail: vybulkin@mail.ru

Elena Valeryevna Fedoseeva — Grand Dr. in Engineering, Professor, Radioengineering Department, Murom Institute (Branch) Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education “Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletovs”².

E-mail: elenafedoseeva@yandex.ru

Ilya Nikolaevich Rostokin — Grand Dr. in Engineering, Professor, Department of Monitoring and Control in Engineering Systems, Murom Institute (Branch) Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education “Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletovs”².

E-mail: rostokin.ilya@yandex.ru

¹*Address:* 197198, Russian Federation, Saint-Petersburg, Zhdanovskaya st., 13.

²*Address:* 602264, Russian Federation, Vladimir region, Murom, Orlovskaya st., 23.

Abstract: A series of articles is dedicated to the development history and current state of radio-meteorological research at Murom Institute of VLSU. The third article of the series deals with the current state with respect to forming methods and equipment development for atmosphere surface sensing. Restoration work of the radio-meteorological facility at Murom Institute began since the beginning of the XXI century. By now a tri-band facility with 1.35 cm, 3.2 cm, 7.5 cm operating wavelengths is executed. Each of radiometers has a three-channel substructure, comprising main channels for measurements in horizontal and vertical polarizations, and auxiliary measuring channel, the output signal of which, in general, is determined by receiving radio-noise signal through scattering area of directional pattern of the main antenna channel. This is solved by using dual-mode and dual-pattern antenna. Engineering implementation of the system was done in stationary, stationary field and mobile basing versions with antennas of 2.5 m; 2.4 m; 1.0 m diameter. There was designed and implemented neural-based data management system to secure a transition from analog to digital form for solving problems of neutralizing background emission effect. The data obtained by the results of processing the received signals suggest system applicability to work out prognostic solutions, for example, in weather alert services. Work is underway to establish the fourth measuring channel of 0.8 cm wavelength. The facility’s diagram using microwave photonics devices and methods was developed; a set of experiments was conducted confirming possibility to improve fluctuation threshold sensitivity of radiometric system as a whole. A summary after the results of the first two and the third stages of development of radio-meteorological research at Murom Institute of VLSU is presented.

Keywords: radiometer, dual-mode dual-pattern antenna, radio-thermal radiation of the atmosphere, microwave photonics, mathematical modeling.

*The research was supported by the grant of the Russian Science Foundation No. 21-19-00378
(<https://rscf.ru/project/21-19-00378>)*

References

1. *Bulkin V.V., Shchukin G.G., Fedoseeva E.V., Rostokin I.N.* Radiometeorological research at the Murom Institute. To the 30th anniversary of the Armand Readings. All-Russian Open Armand readings [Electronic resource]: Modern problems of remote sensing, radar, wave propagation and diffraction. Materials of the All-Russian Open Scientific Conference. Murom: MI VISU, 2022. Pp. 7–20. DOI: 10.24412/2304-0297-2022-1-7-20
2. *Shchukin G.G., Bulkin V.V., Fedoseeva E.V., Rostokin I.N.* Radiometeorological studies at the Murom Institute: Microwave radiometric complex. Radioengineering and telecommunication systems. 2022. No. 2. Pp. 5–19. DOI 10.24412/2221-2574-2022-2-5-19.
3. *Shchukin G.G., Bulkin V.V., Fedoseeva E.V., Rostokin I.N.* Radiometeorological research at the Murom Institute: passive-active radiometeorological complex. Radioengineering and telecommunication systems. 2022, No. 3. Pp. 5–17. DOI 10.24412/2221-2574-2022-2-5-19.
4. *Falin V.V.* Highly informative microwave radiometric systems: dissertation... Grand Dr. in Engineering: 05.12.04. Murom, 1998. 460 p.
5. *Falin V.V.* Radiometric microwave systems. Moscow: Luch, 1997. 440 p.

6. *Falin V.V., Fedoseeva E.V., Soloviev L.P.* Optimal algorithm for constructing radioteplotation systems. Radiolocation, radionavigation and communication. IV International Scientific and Technical Conference. Voronezh, 1998. Pp. 1015–1024.

7. *Rostokin I.N., Fedoseeva E.V.* Investigation of the antenna device of a three-band microwave radiometric system for remote sensing of the atmosphere with compensation for the influence of background radiation. Radioengineering and telecommunication systems. 2015. No. 3. Pp. 94–100.

8. Patent No. RU2300831. Antenna noise reduction method and dual-mode aperture antenna. *Fedoseeva E.V., Rostokina E.A., Rostokin I.N.* Publ.: 10.06.2007. Byul. No. 16

9. *Rostokina E.A.* Investigation of directional properties of a two-mode antenna system with compensation of background radiation of the surrounding space. Radioengineering and telecommunication systems. 2018. No. 4. Pp. 55–60.

10. *Fedoseeva E.V., Shchukin G.G.* Issues of metrological support of radioteplotation measurements under the action of external noise interference: monograph. Murom: IIPC MI VISU, 2012. 103 p.

11. *Rostokin I.N., Karyayev V.V., Fedoseeva E.V., Rostokina E.A., Shchukin G.G.* Short-term forecasting of atmospheric meteorological parameters based on the results of the neural network of a three-band microwave radiometric system. Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 1991. 012016. DOI: 10.1088/1742-6596/1991/1/012016.

12. *Fedoseeva E.V., Rostokin I.N., Shchukin G.G.* Vibration of a tri-band microwave radiometric system with background noise compensation. Measurement Techniques. 2020. Vol. 63. No. 4. Pp. 301–307.

13. *Fedoseeva E.V., Rostokin I.N., Shchukin G.G.* Evaluation of reception conditions in a two-channel microwave radiometric system by an external test signal. News of higher educational institutions. Physics. 2016. Vol. 59. No.12/3. Pp. 117–121.

14. *Karyayev V.V., Rostokin I.N., Fedoseeva E.V., Rostokina E.A.* Neural network in the microwave radiometric monitoring system of the atmosphere. Radioengineering and telecommunication systems 2020. No.4. Pp. 5–14.

15. *Fedoseeva E.V., Rostokin I.N., Shchukin G.G., Rostokina E.A.* Multi-band microwave radiometric sensing of remote rain zones. All-Russian open Armand readings [Electronic resource]: Modern problems of remote sensing, radar, propagation and diffraction of waves. Materials of the All-Russian Open Scientific Conference. Murom: CPI MI VISU, 2020. Pp. 163–168.

16. *Morozov O.G., Morozov G.A., Ilyin G.I., Nureyev I.I., Sakhabutdinov A.Zh., Rostokin I.N., Maltsev A.V., Ivanov A.A., Lustina A.A., Denisenko E.P., Denisenko P.E., Andreev V.D.* Software and hardware spectrum analyzer for radiophoton Doppler measurement devices frequency shift and its sign. Bulletin of the Volga State Technological University. Ser.: Radioengineering and infocommunication systems. 2022. No. 1 (53). Pp. 65–80.