

Всероссийская открытая научная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн» - Муром 2022

УДК 551.501

DOI: 10.24412/2304-0297-2022-1-7-20

Радиометеорологические исследования в Муромском институте. К 30-летию проведения Армандовских чтений

В.В. Булкин¹, Г.Г. Щукин^{1,2}, Е.В. Федосеева¹, И.Н. Ростокин¹

¹ Муромский институт Владимирского государственного университета имени А.Г. и Н.Г. Столетовых

602264, Муром, Владимирская область, ул. Орловская, д.23.

E-mail: oid@mivlgu.ru.

² Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского» Министерства обороны Российской Федерации

197198, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13.

E-mail: yka@mil.ru.

В 2022 году исполняется 30 лет со дня первой Всероссийской конференции по проблемам дистанционного зондирования, проведённой Научным Советом РАН по распространению радиоволн в Муромском институте. В связи с этим рассмотрена история и современное состояние работ по дистанционному зондированию атмосферы в МИ ВлГУ от создания первых радиометрических приёмников в начале 70-х годов до современной лаборатории «Радиофизические исследования природных сред».

Ключевые слова: радиометеорологические системы, дистанционное зондирование, пассивно-активные системы, ослабление радиоволн в осадках, многочастотная микроволновая радиометрическая система

Radiometeorological research at the Murom Institute. The 30th anniversary of the Armand Readings

V.V. Bulkin¹, G.G. Shchukin^{1,2}, E.V. Fedoseeva¹, I.N. Rostokin¹

¹ Murom Institute (branch) of the Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletov.

² Mozhaisky Military Space Academy.

In 2022, the 30th anniversary of the first All-Russian Conference on Remote Sensing of the Earth, held by the Scientific Council of the Russian Academy of Sciences on Radio Wave Propagation at the Murom Institute, is celebrated. In this regard, the history and current state of work on remote sensing of the atmosphere at Moscow State University from the creation of the first radiometric receivers in the early 70s to the modern laboratory "Radiophysical studies of the natural environment" is taken into account.

Keywords: radiometeorological systems, remote sensing, passive-active systems, attenuation of precipitation waves, multi-frequency microwave radiometric system

Введение

В 2022 году исполняется 30 лет со дня первой Всероссийской конференции по проблемам дистанционного зондирования, проведённой Научным Советом РАН по распространению радиоволн в Муромском институте: в 1992 году прошла II Всероссийская научная конференция «Применение дистанционных радиофизических методов в исследованиях природной среды».

Первая Всесоюзная научная школа «Применение дистанционных радиофизических методов в исследованиях природной среды» была проведена Научным советом Российской Академии наук по комплексной проблеме «Распространение радиоволн» в 1990 году в Ереване. Непосредственной организацией школы занимался

Р.М. Мартиросян, в 2006-2021 гг. Президент НАН РА, с 2021 г. Главный советник президиума НАН РА. Как вспоминали её участники, начавшееся резкое снижение уровня жизни и сложности, переживаемые научным сообществом СССР, приводили к мысли, что первая конференция одновременно будет и последней. Возможно, так оно и было бы, если бы в 1991 г. заведующий кафедрой Муромского института В.В. Фалин, заведующий лабораторией ФИРЭ (в прошлом – главный инженер Муромского радиозавода) В.М. Поляков и заместитель директора ГГО Г.Г. Щукин не предложили организовать секцию по радиофизическим методам исследования природной среды в рамках запланированной на 1992 г. Всероссийской конференции «Распространение радиоволн» (г. Казань), проведя её в г. Муроме, как выездное заседание. Однако количество представленных докладов оказалось столь велико, что вместо одной секции было решено организовать шесть, а всё научное мероприятие провести как самостоятельную конференцию. А затем, уже в 1999 г., в Муроме была проведена и третья Всероссийская конференция с таким названием.

Когда в 2009 г. было решено возродить проведение конференций по проблемам радиофизического зондирования, название конференции было скорректировано, и в дальнейшем она проводилась уже как Всероссийская конференция «Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред».

Кроме данной конференции в последующие годы проводились, также, Всероссийские конференции «Дистанционное зондирование земных покровов и атмосферы аэрокосмическими средствами», «Сверхширокополосные сигналы в радиолокации, связи и акустике», «Космическая радиолокация», «Практическая радиолокация». Всего за прошедшие 30 лет проведено более 20 конференций.

С 2010 года проводимые конференции объединены общим названием – Армандовские чтения. С 2017 года Армандовские чтения включают Всероссийскую открытую научную конференцию «Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн» и Молодёжную школу-конференцию «Проблемы дистанционного зондирования, распространения и дифракции радиоволн».

История зарождения радиометеорологического направления в МИ ВлГУ

Работы в направлении создания радиометеорологических систем и комплексов были начаты в самом начале 70-х годов молодым ассистентом Муромского филиала ВЗМИ Валерием Владимировичем Фалиным. Общее руководство работами осуществляли доцент кафедры физики ВЗМИ, к.ф.-м.н. Валерий Васильевич Калашников и профессор, д.ф.-м.н., заведующий кафедрой физики ВЗМИ Борис Николаевич Трубников.

На этом этапе разработка СВЧ-радиометрической аппаратуры осуществлялась для Высокогорного геофизического института (ВГИ, г. Нальчик), Института океанологии (ИО, г. Москва), Центральной аэрологической обсерватории (ЦАО, г. Долгопрудный). Также решалась задача создания собственного СВЧ радиометеорологического комплекса [1].

На базе станции орудийной наводки СОН-4 был создан транспортируемый вариант комплекса с антенной 2,5 м. Полевые испытания созданной аппаратуры в разных зонах страны подтвердили работоспособность комплекса и в 1976 году с использованием антенной колонки от СОН-4 на крыше радиотехнического факультета института была установлен четырёхканальный радиометрический приёмник, как основа комплекса.

Разумеется, в небольшом обзоре невозможно рассмотреть все выполнявшиеся тогда работы и исследования. Вспомним основное из этих работ.

В работах, выполнявшихся под руководством и при непосредственном участии В.В. Фалина (впоследствии доктора технических наук, профессора, заведующего

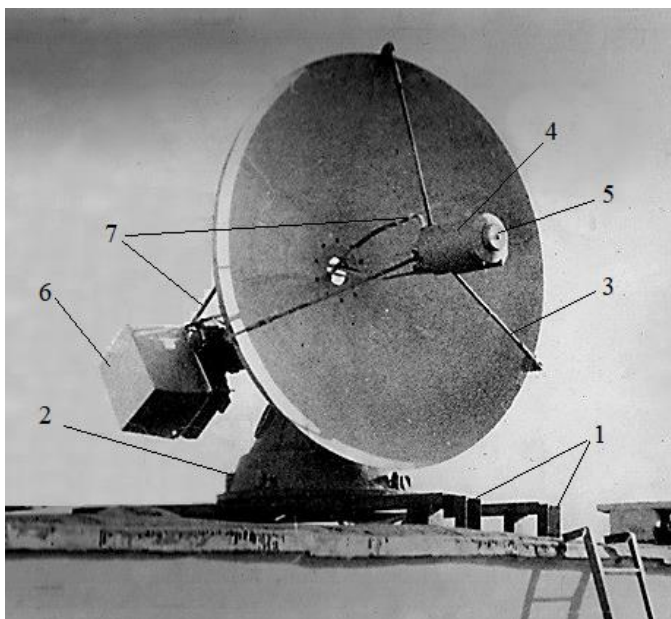
кафедрой) участвовали: С.П. Гинеотис, Р.В. Первушин, В.В. Костров, В.А. Николаев, В.В. Булкин и др.

СВЧ-радиометрический приёмный комплекс

Для построения комплекса был выбран четырёхканальный вариант приёмника с длинами волн $\lambda_1 = 0,8$ см, $\lambda_2 = 1,35$ см, $\lambda_3 = 1,6$ см, $\lambda_4 = 3,2$ см [2].

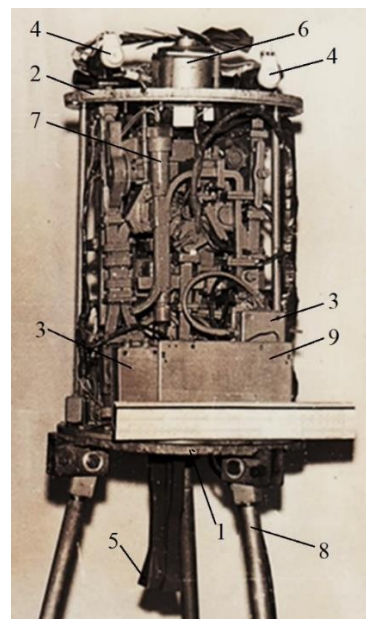
Антенная система была установлена на крыше технического этажа институтского корпуса (рис.1). Все СВЧ элементы модуляционных радиометров были объединены в один блок цилиндрической формы, размещённый перед антенной на трёх растяжках таким образом, чтобы совмещение приёмных рупоров и точки фокуса антенны было максимальным. Затенение раскрыва зеркала не превышало 1,5%. При этом для длин волн 1,35 и 1,6 см был применён двухволновый радиометр, работающий на один облучатель (входной рупор). Его отличительной особенностью являлся узел модуляции, представлявший собой активно-пассивную ферритовую систему, состоящую из трёхплечного переключателя и двух Y-циркуляторов, включённых между выходными плечами переключателя и входами двух приёмников.

Конструкция СВЧ части четырёхканального радиометрического приёмника показана на рис. 2. Для защиты элементов блока от внешних воздействий использовался кожух цилиндрической формы. В простом виде были решены вопросы терморегулирования.



1 – Несущая рама; 2 – Антенная колонка;
3 – Установочные растяжки; 4 - СВЧ часть радиометра; 5 – Крышка вентиляционного отверстия; 6 – Приёмопередатчик РЛС;
7 – Волновод РЛС

Рис. 1. Антенная система комплекса



1 – Основание; 2 – Верхний диск;
3 – ПУПЧ; 4 – Клистрон; 5 – Входные рупоры; 6 – Вентилятор; 7 – ГШ;
8 – Крепёжные растяжки;
9 – Нагревательный элемент

Рис. 2. СВЧ часть радиометрических приёмников (без защитного кожуха)

Контроль чувствительности радиометра осуществлялся калибровкой по встроенным генераторам шума (ГШ), подключаемым через направленный ответвитель.

Низкочастотная часть конструктивно была выполнена в виде шкафа модульной конструкции. Для каждого из каналов использовался отдельный конструктивный модуль. Соединение с СВЧ блоком осуществлялось коаксиальными кабелями.

Параметры, характеризующие антенную систему радиотелескопа и чувствительность радиометров, представлены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры радиотелескопа

Параметр	$\lambda_1=0,8$ см	$\lambda_2=1,35$ см	$\lambda_3=1,6$ см	$\lambda_4=3,2$ см
Измеренная ширина ДН, минут	26,4	37,57	38,2	75
Расчётная ширина ДН, минут	25,5	36	39	78
Измеренное отклонение, минут	0	57	57	-85,7
Расчётное отклонение, минут	0	34	34	-58
Измеренный уровень бокового излучения, дБ	10	12,7	11,5	8
Расчётный уровень бокового излучения, дБ	20	9	15	13
Чувствительность по радиояркостным температурам, К	0,5 -1°К			

Управление антенной системой и контроль её положения осуществлялись с помощью блока управления, построенного с использованием сельсинов, изначально заложенных в конструкцию СОН-4.

Для оценки интенсивности осадков использовался стандартный плевниограф П-2, дополненный резистивным датчиком.

Для контроля высоты облачности использовалась самолётная радиолокационная станция (РЛС) РОЗ-1, блок приёмопередатчика которой был закреплён на «противовесе» антенной колонки (рис.1). Такое расположение блока обеспечивало лучшую балансировку антенной системы.

Радиолокатор включался в активный режим только в положении «в зенит» и при выключенных радиометрах. При этом ортогональное положение приёмных рупоров радиометров и облучателя РЛС также увеличивало уровень развязки. Контроль высоты облачности осуществлялся по ИКО.

Естественным продолжением работ по созданию аппаратуры и проведению измерений полного излучения конденсированной фазы воды явилась необходимость разработки системы для проведения измерений ослабления радиоволн в осадках.

Актуальность получения таких оценок связана с влиянием на значения измеренной радиояркостной температуры изменений как спектра капель в дожде, так и угла их наклона. С целью получения данных о реальном затухании волны и была построена трассовая система.

Была выбрана схема с использованием двукратного прохождения трассы сигналом. Такое решение соответствовало применению системы активно-пассивного типа, построенной по принципу систем ближней радиолокации с частотной модуляцией, что обеспечивало использование в качестве источника излучаемого сигнала и сигнала гетеродина одного генератора – отражательного клистрона, модулируемого по частоте с девиацией менее 5 МГц.

Сложностью анализа принятого сигнала при точном совпадении центра ДН антенны с осью уголкового отражателя являлось выявление модуляционной составляющей и, как результат, сигнала разностной частоты, что и определяло характер изменения сигнала при прохождении через трассу с осадками.

Измерительная трасса была сформирована между двумя зданиями. Поворотные устройства с антеннами и СВЧ частью размещались под крышей технического этажа главного корпуса института, что обеспечивало защиту от прямого попадания дождя на поверхность зеркала антенны. Рабочие длины волн - 1,6 см и 0,8 см. Отражатель уголкового типа, длина трассы 170 м [3,4].

Обеспечивалось измерение изменения величины затухания сигнала на уровне не менее 0,05 дБ.

На рис. 3 показана аппаратура обработки, регистрации и управления работой всего комплекса.

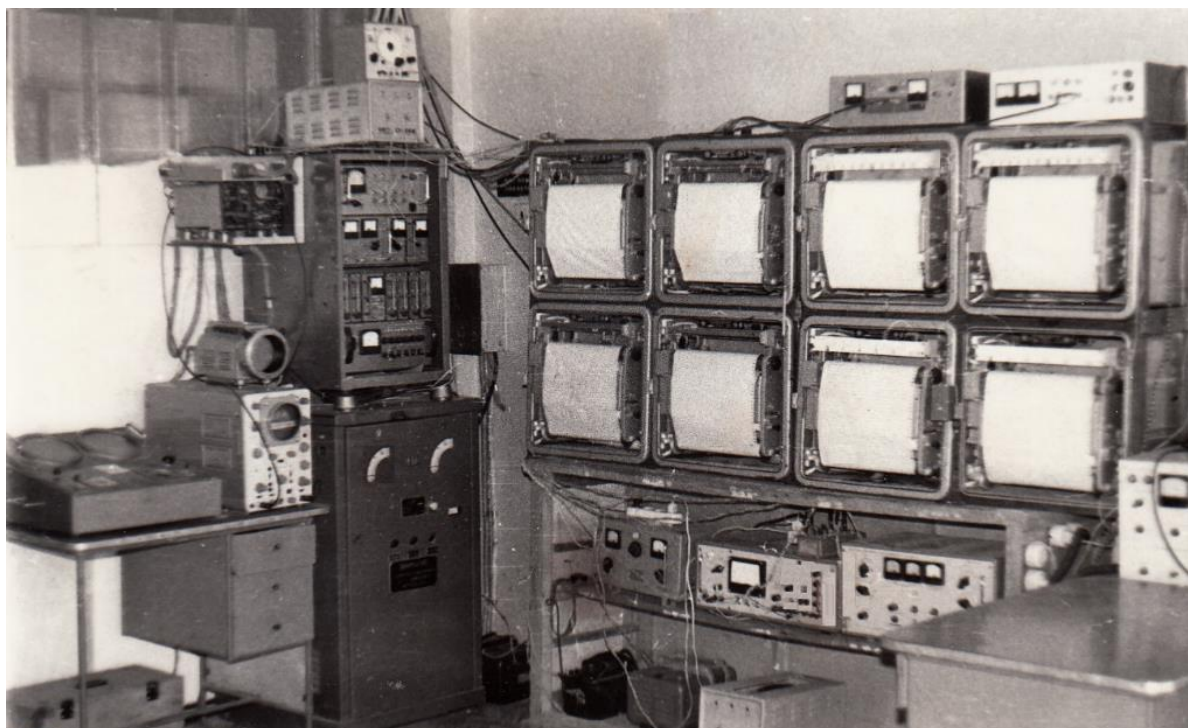


Рис.3. Оборудование управления и обработки информации

Пассивно-активная радиолокационная станция

Следующий этап развития систем радиометеорологии в Муромском институте связан с Главной геофизической обсерваторией (ГГО, г. Ленинград). В этот период основное внимание было уделено созданию пассивно-активной радиолокационной станции (ПАРЛС).

Общеизвестны недостатки пассивной и активной метеорадиолокации. В первом случае главным недостатком является невозможность определения пространственных размеров различных облачных или иных образований (например – зоны осадков), их дальности. Во втором случае существенной проблемой является отсутствие однозначных связей между радиолокационной отражаемостью и водностью облаков и осадков, что обусловлено в основном сильной зависимостью радиолокационной отражаемости от спектра размеров и скоростей падения капель (зависимость от d^6).

Для использования достоинств пассивного и активного методов и компенсации недостатков неоднократно предлагалось использовать совместно оба метода при осуществлении метеонаблюдений.

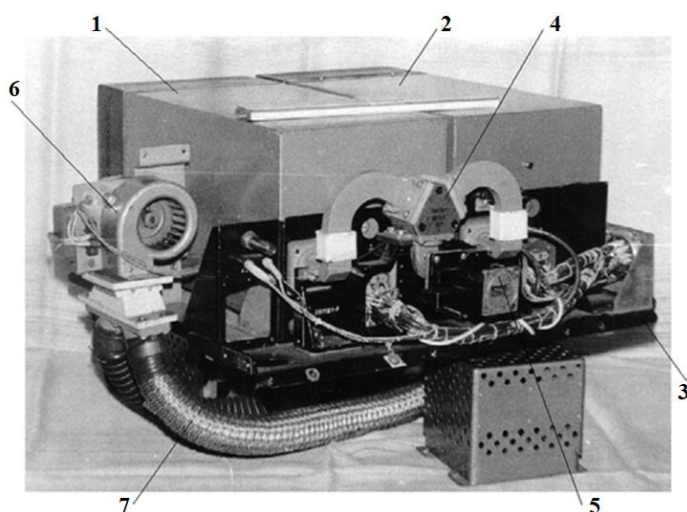
В 70-х годах Г.Г. Щукиным были сформулированы принципы построения пассивно-активных радиометеорологических систем. В соответствии с этим методом средняя водность облака вдоль направления зондирования определялась по отношению [5,6] водозапаса облака вдоль направления визирования, определяемого с помощью пассивного канала (радиометра) и протяженности зондируемой зоны облака (дождя), определяемой с помощью активного канала (радиолокатора)

Основным каналом получения информации о состоянии метеобъекта являлся пассивный канал, а активный канал использовался для определения расстояния до

выявленного объекта, его геометрических размеров. В связи с этим принципы пассивно-активного зондирования изначально базировались на методиках, используемых при пассивном мониторинге.

Прикладное применение ПАРЛС – выявление зон возможного обледенения летательных аппаратов.

За основу построения ПАРЛС была принята самолётная метеонавигационная станция «Гроза». С конструктивной точки зрения станция «Гроза» практически идеально подходила для создания ПАРЛС, поскольку состояла из двух блоков приёмопередатчика – основного и резервного, которые размещены на одной раме и подключаются к антенно-фидерной системе посредством волноводного переключателя [7]. Таким образом, один из блоков использовался как активный канал (АК), а в корпусе другого выполнен приёмник пассивного канала (ПК), что решало вопрос минимизации габаритов (см. рис. 4). Вместо волноводного переключателя был установлен совпадающий по геометрическим размерам Y-циркулятор, с помощью которого осуществлялось решение



1 – АК; 2 – ПК; 3 – несущая рама; 4 - Y-циркулятор;
5 – входной фланец; 6 – вентилятор;
7 – гибкий воздуховод
Рис. 4. Основной блок ПАРЛС

двух задач: подключение АК или ПК к антенне и электромагнитная развязка каналов. Пассивный канал представлял собой модуляционный радиометр супергетеродинного типа с преобразователем на диодах с барьером Шоттки. УПЧ выполнен на двух усилителях с полосой пропускания 700 МГц и общим коэффициентом усиления 50 дБ при коэффициенте шума 4,5 дБ. Это позволило получить флуктуационный порог чувствительности радиометра 0,3 К при постоянной времени $\tau=1$ с.

Синхронизация работы каналов осуществлялась использованием первого полупериода для активного канала, а второго – для приёма радиотеплового излучения (пассивный канал) [7].

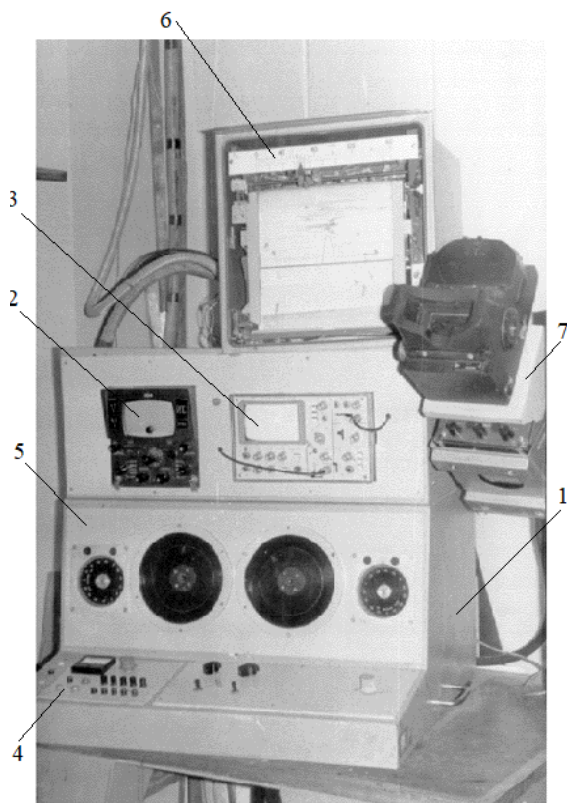
Разумеется, «Гроза» слишком явно проигрывала по основным параметрам таким метеолокаторам, как МРЛ-2 или МРЛ-5. Однако, как показали расчёты, в случае использования антенны диаметром 3000 мм метеорологический потенциал МНРЛС «Гроза» (274 дБ) становится сопоставим с потенциалом МРЛ-2 (283 дБ).

Самым сложным являлся вопрос обеспечения электромагнитной совместимости блоков, что обусловлено влиянием мощного зондирующего импульса передатчика на работу приёмника ПК и влиянием гетеродина ПК на работу приёмника АК.

Элементы узла развязки (Y-циркулятор, разрядник и модулятор) на частоте работы передатчика обеспечивали переходное затухание около 80 дБ. Дополнительно было осуществлено смещение центральной частоты полосы пропускания УПЧ ПК и бланкирование гетеродина в момент излучения зондирующего импульса. Кроме того, был использован дополнительный экран из мягкого пермаллоя для ПК, что обеспечило ещё 30...35 дБ. В результате был обеспечен уровень развязки около 160 дБ [8].

Для стационарного комплекса на крыше института была установлена вторая антенная колонка от СОН-4, причём дополнительно между опорной рамой и колонкой был оборудован «постамент», обеспечивающий установку антенны диаметром 3 м. Рама с АК и ПК устанавливалась на той же несущей конструкции, что и зеркало антенны. Такое решение обеспечивало сокращение длины волновода до излучателя, позволяло избежать применения вращающихся соединений.

Внешний вид пульта управления ПАРЛС показан на рис. 5, антенная система - на рис. 6.



1 – конструкция пульта управления;
2 – ИКО; 3 – осциллограф (индикатор
линейной развёртки); 4 – панель управления
ПК; 5 – панель управления положением
антенны; 6 - регистратор ПК (самописец);
7 – дополнительный ИКО
с фоторегистратором ФАРМ-3.

Рис. 5. Пульт управления ПАРЛС



1 – несущая рама; 2 – антенная колонка;
3 – место размещения АК и ПК;
4 – параболический отражатель;
5 – облучатель; 6 - противовес.

Рис. 6. Антенная система ПАРЛС

Испытание ПАРЛС были проведены в составе наземного комплекса [7] на базе ГГО «Тургошь» с использованием станции МРЛ-2.

Характеристики системы представлены в таблице 2.

Второй вариант системы был установлен на борту самолёта-лаборатории ГГО ИЛ-18 [9].

Таблица 2. Параметры ПАРЛС

П а р а м е т р	Величина
<u>Активный канал</u>	
Импульсная мощность, кВт	9 ... 14
Длительность зондирующих импульсов, мкс	3,5
Рабочая длина волны, см	3,2
Минимальная чувствительность, дБ/мВт	-103
Дальность обнаружения, км	
в пассивно-активном режиме	175
в активном режиме	350
Потенциал с антенной диаметром 3000 мм, дБ	270
<u>Пассивный канал</u>	
Чувствительность, К	0,3
Постоянная времени интегрирования, с	1
Коэффициент шума, дБ	не хуже 4,5
Развязка от активного канала, дБ	160±7

Состояние работ в 90-е годы

В 90-е годы прошлого столетия в силу известных причин активность работ по созданию радиометеорологических систем резко снизилась. Работа продолжалась, но она в значительной степени была теоретической. В этот период разрабатывались новые схемы радиометрических приёмников и ПАРЛС, методы измерения и компенсации помех, калибровки, конструктивные решения отдельных узлов и т.д.

Обобщение многих теоретических работ было дано в монографии В.В. Фалина «Радиометрические системы СВЧ» [10], в защищаемых в тот период диссертациях. К сожалению, в этот период перестали действовать радиометрический комплекс и ПАРЛС.

Среди практически реализованных идей можно отметить создание на основе двухмодовой двухканальной антенны радиотеплолокационной системы с компенсацией фоновых помех [11].

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. Работы продолжились под руководством Е.В. Федосеевой.

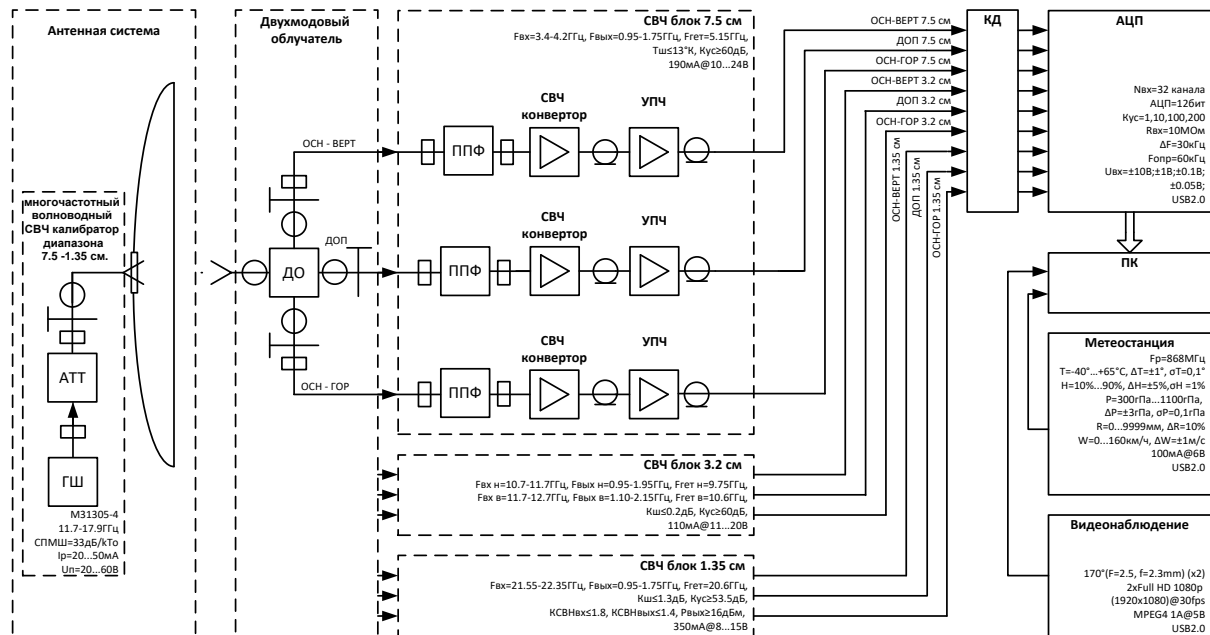
После начала постепенного выхода из кризиса 90-х годов стали возобновляться и практические работы по созданию новых систем. К концу 10-х годов в целом была создана база для построения нового радиометеорологического комплекса.

Разработка и развитие нового комплекса осуществлялась на основе разработанной ранее двухмодовой двухканальной антенны радиотеплолокационной системы с компенсацией фоновых помех [12].

Комплекс, который начинался с использования одного одноволнового радиометра ($\lambda=3,2$ см) к настоящему времени развит до трёхканальной системы: $\lambda_1=1,35$ см, $\lambda_2=3,2$ см, $\lambda_3=7,5$ см. При этом каждый из радиометров имеет свою трёхканальную внутреннюю структуру, включающую основные измерители на горизонтальной (ГОР) и вертикальной (ВЕРТ) поляризациях, и дополнительный (ДОП) измерительный канал.

Реализация такой трехдиапазонной системы с внутренним дополнительным разделением на три канала при работе на общее зеркало антенны определяет условия компенсации влияния фоновых шумов на результаты измерений с возможностью оценки поляризационных контрастов [13].

Структурная схема многочастотной микроволновой радиометрической системы представлена на рис. 7.



ГШ – Генератор шума; АТТ – Волноводный управляемый аттенуатор; ДО – Двухмодовый облучатель; ППФ – Волноводный полосно-пропускающий фильтр; УПЧ - Усилитель промежуточной частоты; КД – Многоканальный квадратичный детектор; АЦП – Аналогово-цифровой преобразователь; ПК - Персональный компьютер; ОСН-ГОР – Сигнал основного измерительного канала горизонтальной поляризации; ОСН-ВЕРТ – Сигнал основного измерительного канала вертикальной поляризации; ДОП – Сигнал дополнительного измерительного канала.

Рис. 7. Структурная схема многочастотной микроволновой радиометрической системы

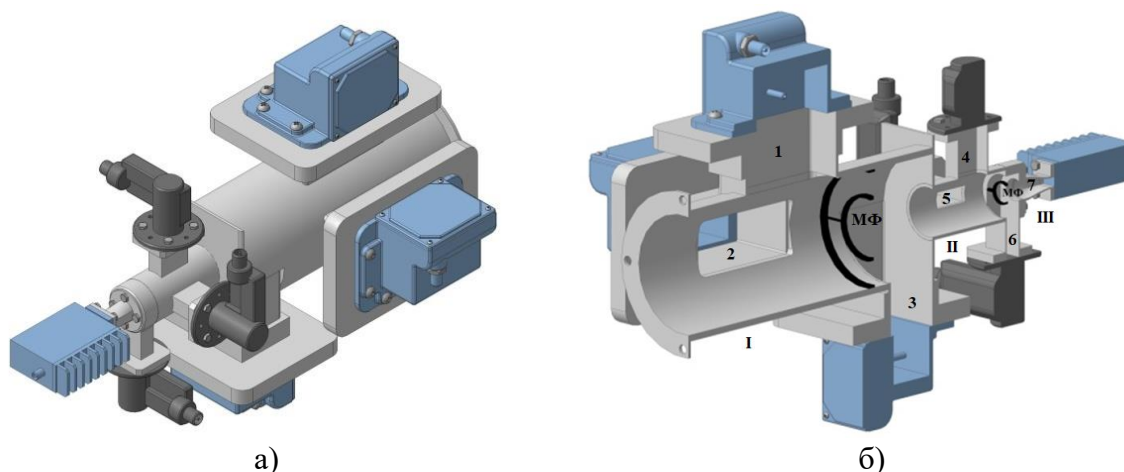
На вход блока обработки поступают три входных сигнала, которые при условии абсолютной поляризационной развязки каналов и изотропности радиозумового излучения, принимаемого из области рассеяния ДН основного антенного канала, обеспечивают формирование на выходе блока обработки сигналов, в которых отсутствуют составляющие, обусловленные собственными шумами радиометра и приёмом фонового шума через область рассеяния ДН антенны.

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 направлению, причём по дальним боковым направлениям точность компенсации выше [14,15,16,17].

Трёхмерная модель двухмодового облучателя, составляющего своеобразное «ядро» трёхдиапазонной микроволновой радиометрической системы и формирующего основные и дополнительные входные сигналы в трёх частотных диапазонах (I – 4 ГГц, II – 10 ГГц, III – 22 ГГц), показана на рис. 8. Для разделения волн H_{11} и E_{01} в каждой из трёх секций антенного устройства расположены модовые фильтры (МФ) – режекторные кольца.

Также была проведена разработка системы сбора и обработки данных многочастотной микроволновой радиометрической системы, позволяющая выполнять автоматическую обработку радиометрических данных путём перехода от аналоговой к цифровой форме решения задач компенсации влияния фонового излучения с выходом на уровень программной реализации [18].



1, 4, 7 и 2, 5 – основные измерительные каналы на вертикальной и горизонтальной поляризациях при приёме на волне H_{11} ; 3 и 6 – дополнительные каналы формирования сигнала компенсации при приёме на волне E_{01} ; МФ - модовые фильтры.
Рис. 8. Двухмодовый облучатель многодиапазонной микроволновой радиометрической системы с компенсацией фонового излучения: а) внешний вид; б) внутреннее строение.

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. 9, внешний вид одного из промежуточных вариантов многодиапазонного двухмодового облучателя со снятой метеозащитой, установленного в фокусе антенны показан на рис. 10. Полевой стационарный вариант собран с лепестковым зеркалом диаметром 2,4 м и установлен на уровне земли в сельской местности. Мобильный вариант показан на рис. 11.

Многодиапазонный двухмодовый облучатель в варианте трёх волн и трёх каналов в каждом диапазоне показан на рис. 12.

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 Г.Г. Щукин

В настоящее время ведётся работа по созданию двухмодового облучателя на четыре длины волны: 0,8; 1,35; 3,2 и 7,5 см. Основные технические характеристики четырёхканального микроволнового комплекса для случаев применения антенн диаметром 1 м (мобильный вариант) и 2,4 м (стационарный полевой) по результатам моделирования приведены в таблице 3.

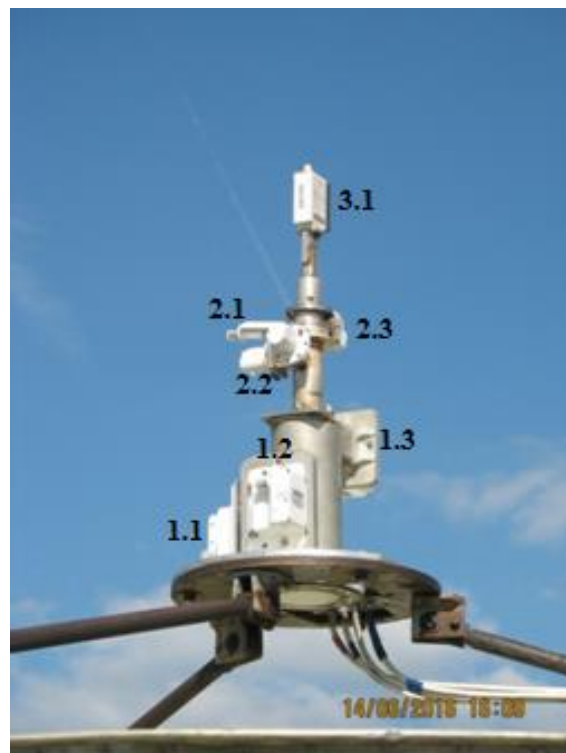
В целом ведётся работа по формированию базы для создания такой системы зондирования, которая могла бы быть включена в структуры слежения за текущей

погодой и составления сверхкраткосрочных прогнозов опасных явлений с заблаговременностью до трёх часов.



- 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. 9. 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. 10. Облучатель без метеозащиты

Таблица 3. Параметры многодиапазонной микроволновой радиометрической системы

Параметр	Значение			
1. Длина волны, λ см.	7,5	3,2	1,35	0,8
2. Радиометрическая чувствительность ΔT , при постоянном времени интегрирования $\tau = 1$ с.	0,03	0,04	0,05	0,07
3. Полоса пропускания, Δf МГц.	800	1000	800	800
4. Шумовая температура приемника, $T_{ш пр}$ °К	13	13	101	438
5. Коэффициент усиления приемника, G дБ.	60	60	53	50
Мобильный вариант, антенна $D = 1000$ мм, $F = 320$ мм				
6. Ширина диаграммы направленности по уровню -3 дБ, градусы	5,07	2,16	0,91	0,54
7. Коэффициент усиления антенны, $K_{ус}$ дБ.	31,54	38,94	46,43	50,98
Стационарный полевой вариант, антенна $D = 2400$ мм, $F = 900$ мм				
8. Ширина диаграммы направленности по уровню -3 дБ, градусы	0,21	0,09	0,038	0,023
9. Коэффициент усиления антенны, $K_{ус}$ дБ.	59,15	66,55	74,05	78,59



1 – Антенная колонка; 2 – Антенна; 3 – Радиометрическая система; 4 – Поворотное устройство; 5 – Метеостанция; 6 – Элементы блоков управления и обработки информации; 7 - Электродгенератор
Рис. 11. Мобильный вариант системы

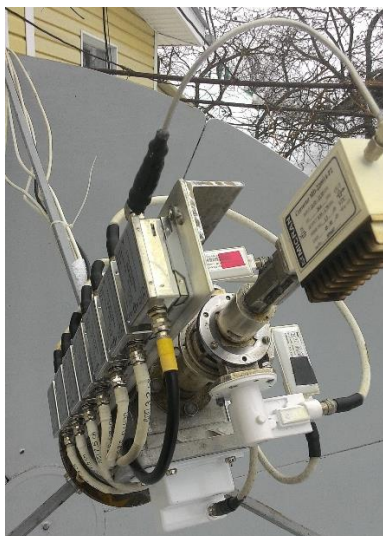


Рис. 12. Многодиапазонный двухмодовый облучатель

В настоящее время работы в Муромском институте по созданию многодиапазонной микроволновой радиометрической системы ведутся под руководством Г.Г. Щукина. Наибольший вклад в создание этих систем внесли Е.В. Федосеева, И.Н. Ростокин, Е.А. Ростокина.

Заключение

За прошедшие годы в Муромском институте можно выделить несколько этапов в работах по созданию систем и развитию методов дистанционного зондирования. По тематике работ было опубликовано большое число статей, получено Авторских свидетельств и Патентов на изобретения, подготовлено и опубликовано три монографии,

несколько учебных пособий. Подготовлено и успешно защищено восемь кандидатских и четыре докторских диссертации.

Наработанный к настоящему времени опыт позволяет рассчитывать, что задачи, поставленные в рамках лаборатории «Радиофизические исследования природных сред» будут успешно выполнены.

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

Литература

1. 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, №1. -С.5-19.
2. Калашников В.В., Трубников Б.Н., Фалин В.В. Радиотехнический комплекс для исследования влагосодержания и водосодержания атмосферы / Труды Всесоюзного симпозиума по радиофизическим исследованиям атмосферы. –Л.: Гидрометеиздат, 1977. -С.216-222.
3. Костров В.В., Фалин В.В., Николаев В.А. Исследования микроструктуры осадков по поляризационным измерениям // Межведомственное совещание по распространению ультракоротких радиоволн и электромагнитной совместимости (тезисы докладов). - Улан-Удэ: -1983. - С.120-122.
4. Фалин В.В., Костров В.В., Николаев В.А., Гинеотис С.П. Идентификация дождей по ослаблению и излучению микрорадиоволн в ортогональных плоскостях. / XIV Всесоюзная конференция по распространению радиоволн, Ленинград, 1984 // Тезисы докладов. -М.: Наука. 1984. - С.24-25.
5. Щукин Г.Г., Булкин В.В. Метеорологические пассивно-активные радиолокационные системы: монография. –Муром: ИПЦ МИ ВлГУ, 2009. –166 с.
6. Щукин Г.Г., Булкин В.В. Метеорологическая пассивно-активная радиолокация / Радиотехника и электроника, 2011, том 56, № 5. -С. 549–572.
7. Гинеотис С.П., Фалин В.В., Костров В.В., Булкин В.В., Первушин Р.В., Васильцов И.М. Метеорологический пассивно-активный комплекс / Радиометеорология: Труды VII Всесоюзного совещания. - Л.: Гидрометеиздат, 1989. -С.122-124.
8. Ермаков И.В., Гинеотис С.П. Метод повышения электромагнитной совместимости в пассивно-активном радиолокаторе / Достижения радиоэлектроники и автоматики - народному хозяйству // Тезисы докладов Республиканской НТК. – Свердловск: 1985. –С.9.
9. Фалин В.В., Первушин Р.В., Щукин Г.Г., Гинеотис С.П., Николаев В.А., Канарейкин Д.Б. Бортовая пассивно активная радиолокационная станция / Труды ГГО, 1991, Вып. 535. С.61-65.
10. Фалин В.В. Радиометрические системы СВЧ: монография. -М.: Луч, 1997. -440 с.
11. Фалин В.В., Федосеева Е.В. Решение задачи оптимизации при моделировании ДН антенных систем / Актуальные проблемы анализа и обеспечения надёжности и качества приборов, устройств и систем // Сборник докладов международной НТК. –Пенза: 1996. 34-35.
12. Патент РФ № 2300831. Способ снижения уровня шума антенны и двухмодовая апертурная антенна / Е.В. Федосеева, Е.А. Росточкина, И.Н. Ростокин. Оpubл.: 10.06.2007, Бюл. №16.
13. Ростокин И.Н., Федосеева Е.В. Исследование антенного устройства трехдиапазонной СВЧ-радиометрической системы дистанционного зондирования

атмосферы с компенсацией влияния фонового излучения / Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2015. – № 3. – С. 94 – 100.

14. 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.

15. 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, Volume 1991, Russian open scientific conference «Modern problems of remote sensing, radar, wave propagation and diffraction» (MPRSRWPD) 2021 25-27 May 2021, Murom, Russian Federation V. 1991, 012016

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

17. 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.

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