

Дистанционное зондирование сред

DOI 10.24412/2221-2574-2022-2-5-19

УДК 551.501

РАДИОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В МУРОМСКОМ ИНСТИТУТЕ: СВЧ-РАДИОМЕТРИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС

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: vbulkin@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: Рассмотрена история и особенности СВЧ радиометрического комплекса для радиометеорологических исследований атмосферы. Комплекс создавался на начальном этапе работ по проведению дистанционного зондирования атмосферы в Муромском институте ВлГУ. Основу комплекса составлял четырёхканальный приёмник, работающий на длинах волн 0,8; 1,35; 1,6 и 3,2 см. СВЧ часть была выполнена в виде отдельного конструктива цилиндрической формы, размещаемого в фокальной плоскости параболической антенны таким образом, чтобы приёмные рупоры находились в зоне фокуса. Блок антенной колонки с антенной диаметром 2,5 м располагался на крыше технического этажа основного корпуса института. Также на антенной системе был установлен приёмопередатчик РЛС «РОЗ-1», который дополнительно выполнял функции противовеса балансировки положения антенны. Аппаратура управления располагалась в лаборатории верхнего этажа здания. Была разработана трассовая система для проведения измерений ослабления радиоволн в осадках. База трассовой установки — 170 м. Представлены сведения об особенностях разработанной аппаратуры, сопутствующих исследованиях.

Ключевые слова: радиотепловое излучение атмосферы, радиометеорологические системы, СВЧ-радиометрический комплекс, ослабление радиоволн в осадках, диаграмма направленности.

Введение

В 2021–2022 годах сошлось несколько юбилейных дат, связанных с журналом «Радиотехнические и телекоммуникационные системы» и Муромским институтом ВлГУ. В 2001 году в институте начался выпуск межвузовского сборника «Методы и устройства передачи и обработки информации». В 2011 году на основе этого сборника начался выпуск двух журналов: «Методы и устройства передачи и обработки информации» (входит в РИНЦ) и «Радиотехнические и телекоммуникационные системы» (список ВАК). В 2022 году исполняется 30 лет со дня первой Всероссийской конференции по проблемам дистанционного зондирования (ныне – Всероссийские открытые Арmandовские чтения), проведённой Научным Советом РАН по распространению радиоволн в Муромском институте. Кроме того, в текущем году исполняется 65 лет со дня основания Муромского института, начинавшего свой жизненный путь в 1957 году как учебно-консультационный пункт Всесоюзного заочного машиностроительного института (ныне Московский государственный университет приборостроения и информатики — МГУПИ).

Радиотехническое направление в институте было одним из наиболее развитых, что в значительной степени определялось связью с предприятиями радиотехнического профиля, определявшими основу промышленного потенциала города. И уже в середине 60-х годов в Муромском филиале ВЗМИ начали проводиться научные работы по радиотехническим направлениям, в первую очередь связанным с зондированием природных сред.

В предлагаемом цикле статей будет рассмотрена история, достижения, современное состояние и перспективы одного из этих направлений — дистанционного зондирования атмосферы.

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, кандидат физико-математических наук Валерий Васильевич Калашников и профессор, доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой физики ВЗМИ Борис Николаевич Трубников. На проведение работ в рамках хоздоговорных НИР выделялись необходимые средства, что позволило не только решать проблемы материально-технического характера, но и привлечь к работе преподавателей и сотрудников других кафедр и подразделений, студентов. При этом ряд работ проводился в рамках программ Государственного комитета СССР по науке и технике.

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.

Создание комплекса аппаратуры требовало решения задач методического, схемотехнического и конструктивного плана. Кроме того, необходимо было обеспечить получение достоверных данных о сопутствующих параметрах, таких, как интенсивность осадков или высота облачности. Всё это представляло собой комплекс взаимосвязанных задач, требующих не только теоретического анализа, не только решения схемно-конструкторских и теоретических задач, но и обеспечения эффективной работы привлекаемых сотрудников и студентов. Все эти задачи решались В.В. Фалиным. Основной теоретический анализ, разработка схемных и поиск оптимальных конструкторских решений, выполнение оценочных расчётов, реализация работ по созданию комплекса — всё это было выполнено либо непосредственно им, либо под его непосредственным руководством. Закономерным итогом этих ра-

бот стала подготовленная и защищённая В.В. Фалиным диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук [1].

Первоначально радиометрические приёмники выполнялись в виде отдельных конструктивных блоков, а схемы управления и согласования с самописцами (регистрирующие приборы) располагались в двух шкафах. Антенная система состояла из совокупности параболических антенн небольшого диаметра, закреплённых на общей раме. Впоследствии эти антенны использовались для создания трассовой установки.

В 1974 году прошли первые полевые испытания созданной аппаратуры. Поскольку в тот период времени основным заказчиком выступал ВГИ, испытания проходили на его базе в районе города Нальчик.

Своеобразный отчёт о работе экспедиции был дан в журнале «Радио» (Смагин Б. Тёплые дожди / Радио, №8, 1975. С. 22–23). На рис. 1 представлено фото из статьи с подписью «В. Фалин настраивает СВЧ-радиометрическую аппаратуру», на рис. 2 на фото из той же статьи показана несущая рама с закреплёнными на ней антеннами.

В дальнейшем для создания полноценного радиометеорологического комплекса и обеспечения его транспортировки к месту полевых испытаний использовалась переданная институту конструкция и оборудование снятых с вооружения станций орудийной наводки СОН-4. Станция имела антенную колонку управления положением антенны, средства управления и контроля положения антенны при сканировании (угол азимута и угол места), уста-

новку питания (преобразователь стандартного сетевого напряжения в напряжение питания частотой 400 Гц). Особенностью станции было то, что антенная колонка устанавливалась на платформе, способной при транспортировке опускаться на пол кабины (кунга) станции. Сама кабина была установлена на колёсное шасси, что обеспечивало её транспортировку в качестве прицепа грузового автомобиля.

В 1975 году полевые испытания аппаратуры, установленной в кунге СОН-4, проходили в двух точках: в пригороде г. Калинин и около н.п. Курортное под г. Феодосия, Крым. В 1976

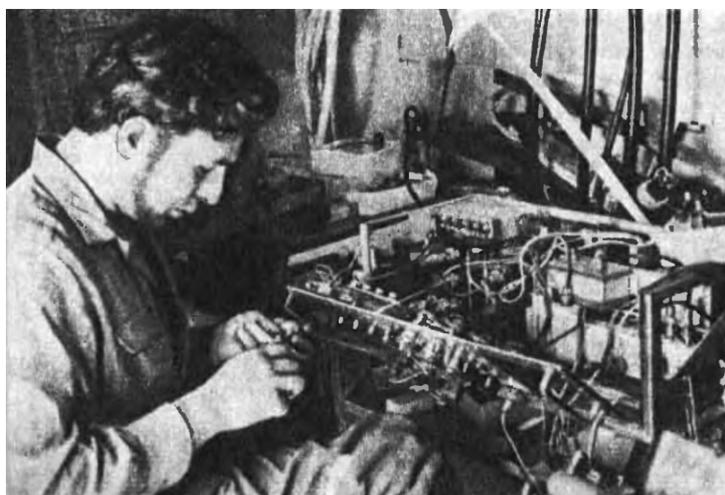


Рис. 1. Фото из журнала «Радио», №8, 1975 г.: «В. Фалин настраивает СВЧ-радиометрическую аппаратуру»

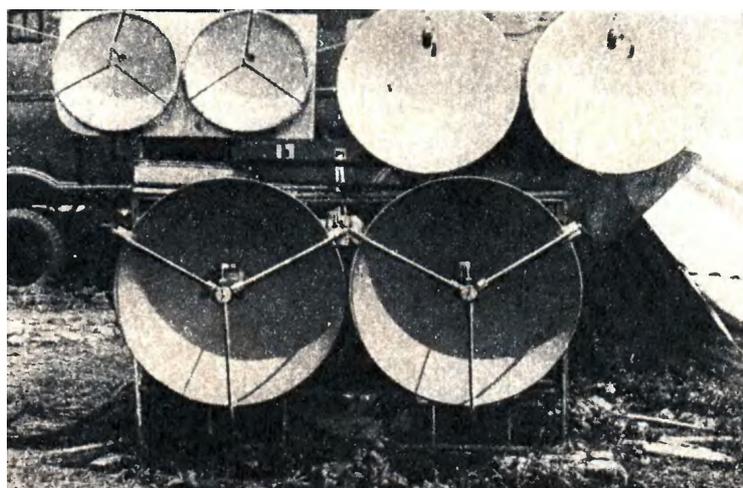


Рис. 2. Фото из журнала «Радио», №8, 1975 г.: «Антенны для радиометрических измерений. Готовится эксперимент»

— на острове Сааремаа, в районе г. Кингисепп, Эстонская ССР. В комплексе использовалась антенна диаметром 2,5 м.

К этому моменту в целом уже была определена идеология построения измерительного комплекса, отработаны схемные и конструктивные решения всех составляющих. И осенью 1976 года была проведена работа по установке на крыше радиотехнического факультета института антенной системы. Антенная колонка была использована от одной из станций СОН-4.

Была создана трассовая система контроля ослабления волн в осадках, также установленная на крыше здания института. Для контроля границ облачности на антенную систему дополнительно был установлен радиолокатор.

Следующий этап развития систем радиометеорологии в Муромском институте связан с Главной геофизической обсерваторией (ГГО, г. Ленинград). В рамках сотрудничества с ГГО были созданы два варианта пассивно-активной радиолокационной станции (ПАРЛС). Первый вариант был предназначен для создаваемого на базе МИ ВлГУ пассивно-активного комплекса, прошёл апробацию и проверку в полевых условиях на базе ГГО «Тургошь» и был установлен на крыше одного из зданий института. Второй вариант был установлен на борту самолёта-лаборатории ГГО ИЛ-18.

Создание аппаратуры совмещённого типа также требовало решения методических вопросов: от совместной обработки результатов измерений до задач практического применения получаемой информации. Также актуальными в тот период стали проблемы автоматизации обработки данных.

К сожалению известные проблемы последнего десятилетия XX века свели на нет возможность полноценной работы в практической части и продолжение исследований было общетеоретическим. Разрабатывались новые схемы измерительных приёмников, алгоритмов обработки.

С началом XXI века работы постепенно снова перешли в практическую область. В

настоящее время в институте создана научно-исследовательская лаборатория «Радиофизические исследования природных сред». Научный руководитель лаборатории — доктор физико-математических наук, профессор Щукин Г.Г.

Рассмотрение истории вопроса и его современного состояния требует значительного объёма журнального пространства, а значит не может быть изложено в одной статье. Предполагается рассмотрение основных этапов работ в рамках отдельных статей.

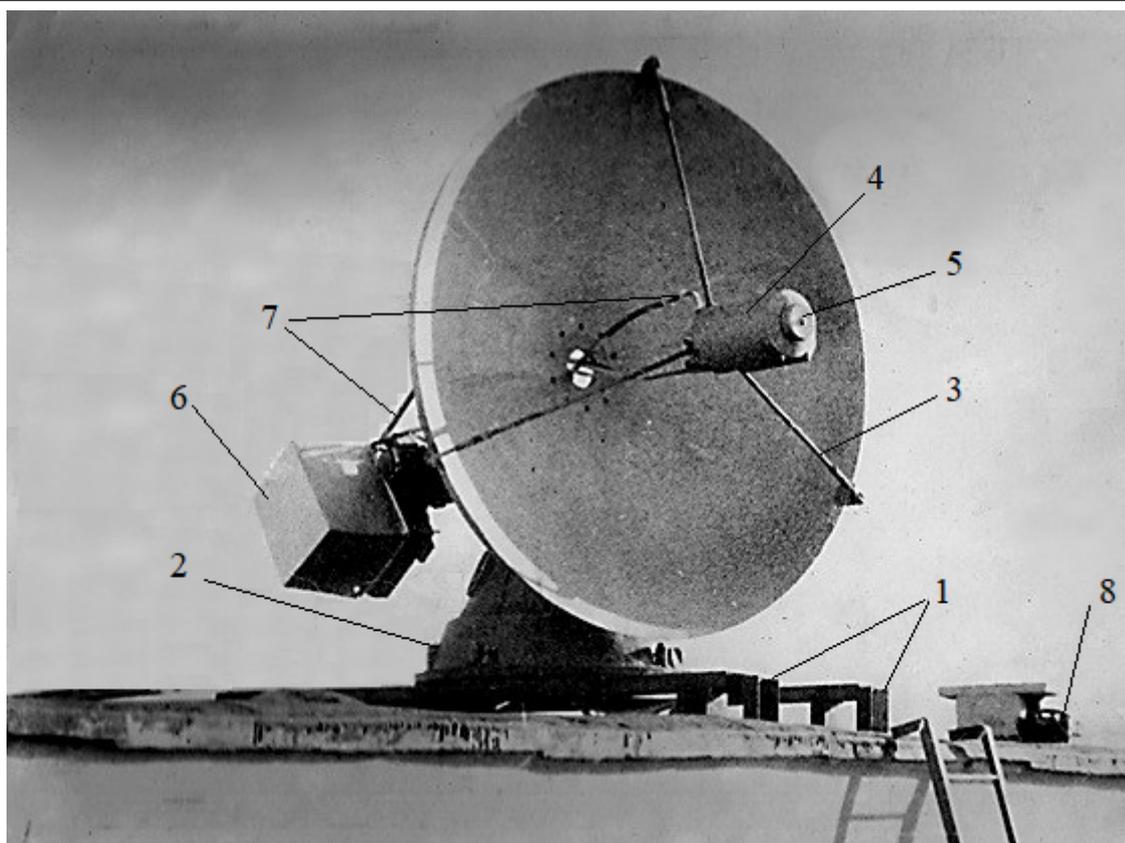
В предлагаемом описании первого этапа развития радиометеорологии в Муромском институте основное внимание уделено техническим вопросам создания аппаратуры.

СВЧ-радиометрический приёмный комплекс

Как известно, пассивная радиолокация основана на приёме собственного радиотеплового излучения атмосферы посредством пассивных радиолокационных (радиотеплолокационных, СВЧ-радиометрических) приёмников. Метеообъекты, как и всякие тела, температура которых отлична от абсолютного нуля, излучают электромагнитные волны в широком диапазоне частот. Источником такого излучения является случайное тепловое движение электронов, находящихся внутри рассматриваемого тела [2].

Решение задач радиометеорологического зондирования атмосферы - определение интегральной влажности атмосферы, водности облаков и осадков - требовало создания радиометеорологических приёмников, обеспечивающих проведение измерений радиотеплового излучения облаков и осадков в относительно широком диапазоне длин волн [3]. Выбор диапазона и конкретных длин волн и был главной задачей начального этапа работ.

Для построения комплекса был выбран четырёхканальный вариант приёмника в диапазоне волн 0,8...3,2 см. Выбор этого диапазона обусловило то, что в этом диапазоне вариации радиояркой температуры за счёт вариаций профиля температуры по высоте не превыша-



1 — Несущая рама; 2 — Антенная колонка; 3 — Установочные растяжки; 4 — СВЧ часть радиометра; 5 — Крышка вентиляционного отверстия; 6 — Приёмопередатчик РЛС; 7 — Волновод РЛС; 8 — Армейский полевой телефон ТАИ-43

Рис. 3. Антенная система комплекса

ют $\sim 2,5^\circ\text{K}$, что важно с точки зрения задачи определения влаго- и водосодержания атмосферы.

Выбор конкретных длин волн определялся следующими соображениями. При наличии облаков, не дающих осадков, более информативным является коротковолновое крыло полосы поглощения водяного пара $\lambda = 0,8 \dots 1,35$ см, т.к. в этом диапазоне реализуется высокое отношение сигнал/шум. При выпадении осадков возрастает информативность длинноволнового крыла $\lambda = 1,35 \dots 3,2$ см, т.к. при интенсивности дождя 20-30 мм/час атмосфера становится «абсолютно чёрным телом» (АЧТ) на волне 0,8 см и, соответственно, уменьшается динамический диапазон и отношение сигнал/шум. Длина волны 1,35 см обеспечивает определение величины водяного пара

в атмосфере и, в сочетании с другими диапазонами, является оптимальной для анализа слоистых облаков.

Таким образом, основу создаваемого комплекса составляли радиометрические приёмники на длины волн $\lambda_1 = 0,8$ см, $\lambda_2 = 1,35$ см, $\lambda_3 = 1,6$ см, $\lambda_4 = 3,2$ см [4].

Важным вопросом являлось конструктивно-пространственное объединение приёмников в единый конструктивный блок с установкой на одну антенную систему, поскольку создание четырёх отдельных систем с использованием отдельных антенн вызывало слишком существенное удорожание всего комплекса, а, кроме того, слишком усложняло управление работой антенных систем для обеспечения синхронности их положений. Поэтому конструктивно все четыре приёмника были объединены

в единую конструкцию, устанавливаемую в фокусе антенны.

Как уже отмечалось, для управления положением антенны была использована антенная колонка от станции СОН-4, установленная на крыше технического этажа главного корпуса института. Поскольку конструкция этой колонки изначально была спроектирована под антенну диаметром 1,8 м, а в комплексе планировалось применить антенну большего диаметра, сама конструкция была установлена на специальной раме, выполненной из профиля типа швеллер с шириной 240 мм, выше уровня крыши. Антенна устанавливалась на поворотное устройство через переходной модуль. Такое решение смещало баланс сил в системе стабилизации движения по углу места. Эта проблема была решена сначала установкой дополнительных балансирующих противовесов, а затем - установкой вместо них блока приёмопередатчика РЛС.

Совмещение приёмных рупоров с фокусным центром антенны было обеспечено созданием единой конструкции приёмного блока, размещаемого перед антенной на трёх растяжках таким образом, чтобы это совмещение было максимальным. При этом в первую очередь необходимо было обеспечить расположение точно в фокусе облучателя (приёмного рупора) радиометрического канала, работающего на наиболее короткой волне 0,8 см.

Стремление уменьшить вынос облучателей из фокуса привело к разработке двухволнового радиометра (длины волн 1,35 и 1,6 см), работающего на один облучатель (входной рупор). Размеры рупора были выбраны соответствующие длине волны 1,6 см, что позволило выровнять ширину диаграммы направленности (ДН) для обоих каналов, т.к. ДН на волне 1,35 см становится шире за счёт меньшего коэффициента использования площади антенны ввиду более узкой ДН облучателя на волне 1,35 см.

Отличительной особенностью двухволнового радиометра 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.

Все СВЧ элементы четырёх радиометров были объединены в один блок цилиндрической формы с диаметром основания 0,28 м. Дополнительную сложность в таком конструктивном решении вызывала разница в размерах волноводов, особенно для длин волн 0,8 см и 3,2 см. Блок располагался перед фокальной плоскостью антенны. Затенение раскрыва зеркала не превышало 1,5%. Такое решение позволило, кроме прочего, исключить применение длинных волноводных линий и, следовательно, уменьшить величину неконтролируемых потерь.

Конструкция СВЧ части четырёхканального радиометрического приёмника показана на рис. 4.

СВЧ часть включала модуляторы, дистанционные аттенуаторы, направленные ответвители, смесители, клистронные гетеродины, ГШ, предварительные усилители промежуточной частоты (ПУПЧ), УПЧ с квадратичным детектором. Полоса УПЧ 200-300 МГц была выбрана потому, что дальнейшее её расширение с целью повысить чувствительность радиометров оказалось невозможно в силу того, что из-за сложностей согласования УПЧ с балансным смесителем возникали дополнительные трудности с развязкой при возможной совместной работе с РЛС [5].

Для защиты элементов блока от внешних воздействий использовался кожух цилиндрической формы.

Поскольку работа клистронов сопровождается выделением тепловой энергии, которая в условиях замкнутого объёма (работа внутри внешнего кожуха) начинает влиять на все остальные составляющие блока, причём дополнительную «порцию» тепловой энергии в момент калибровки обеспечивали электровакуумные генераторы шума (ГШ), необходимо было решить вопрос некоторой термостабилизации или терморегулирования. Для стабилизации теплового режима в верхней части

СВЧ блока был установлен вентилятор, совместно с регулируемым зазором в верхней части кожуха обеспечивающий режим вытяжной вентиляции.

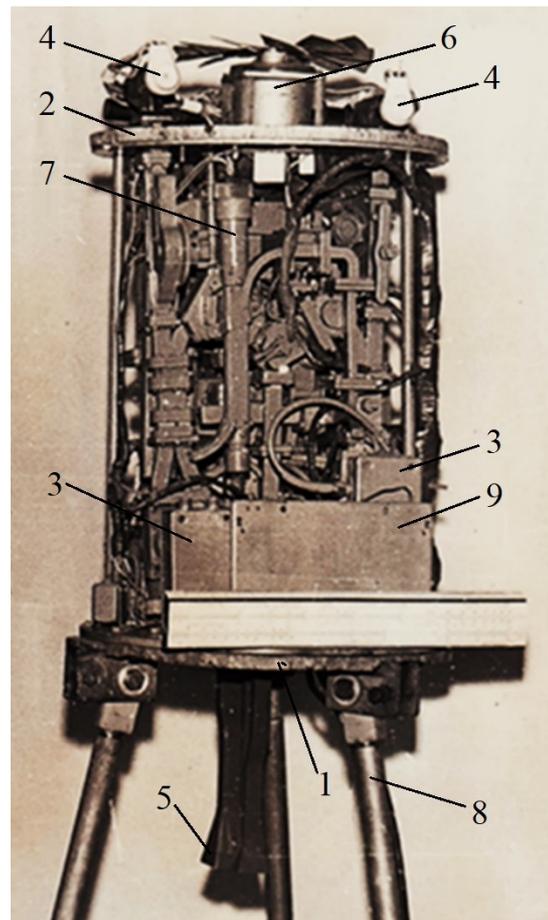
В зимнее время внутрь кожуха вставлялась утепляющая прослойка, верхнее отверстие в кожухе закрывалось и включался нагревательный элемент.

Положение трёх облучателей (рупоров) относительно фокальной плоскости антенны показано на рис. 5. Также на рисунке показан облучатель трёхсантиметрового радиолокатора, который был установлен позже.

Так при расположении СВЧ блока четырёх радиометров перед фокальной плоскостью, в фокус зеркальной антенны диаметром 2,5 м с фокусным расстоянием 0,751 м был помещён облучатель канала $\lambda_1 = 0,8$ см. При этом линейное смещение фазового центра облучателя на волнах λ_2 и λ_3 — $\Delta_{\lambda_2, \lambda_3} = 12$ мм — вызвало отклонение максимума диаграммы направленности на угол $\theta_{\max} = 57'$, а смещение $\Delta_{\lambda_4} = 20$ мм — на угол $\theta_{\max} = 86'$ относительно максимума диаграммы направленности на волне λ_1 . Такое смещение облучателей в сторону от фокуса, естественно, вызывает нарушение фазового распределения поля в раскрыве антенны и, как следствие, рост боковых лепестков.

Упрощение конструкции радиометров было достигнуто за счёт использования модуляционных радиометров и схем супергетеродинного приёма. В качестве гетеродинов использовались клистроны. Уменьшение паразитной модуляции, обусловленной проникновением излучения соседних каналов, обеспечивалось применением в схеме балансного смесителя на щелевом мосте, обеспечивающем развязку между каналами не менее 15–17 дБ.

Контроль чувствительности радиометра осуществлялся калибровкой по встроенным ГШ, подключаемым через направ-



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

Рис. 4. СВЧ часть радиометрических приёмников (без защитного кожуха)

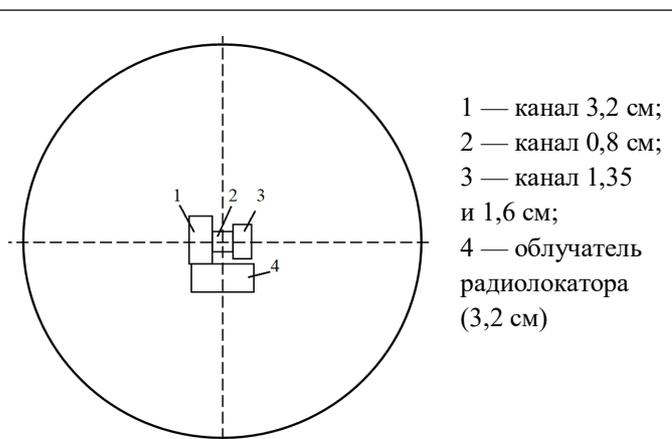


Рис. 5. Размещение облучателей на фокальной плоскости антенны

1 — канал 3,2 см;
2 — канал 0,8 см;
3 — канал 1,35 и 1,6 см;
4 — облучатель радиолокатора (3,2 см)

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 радиоярким температурам, К | 0,5–1°К | | | |

ленный ответвитель. Уровень сигнала калибровки составлял 180–200°К. В двухволновом радиометре калибровочный сигнал вводился через общий для обоих каналов направленный ответвитель. Первичная калибровка осуществлялась посредством изменения температуры согласованной нагрузки, подключаемой к входу радиометра. В процессе проведения измерений также проводилась калибровка с использованием внешнего АЧТ, закрывавшего плоскость приёмных рупоров.

Низкочастотная часть (НЧ) включала синхронный детектор, усилитель низкой частоты, генератор частоты модуляции и узкополосный усилитель частоты модуляции, фазорегулятор тракта усиления, усилитель постоянного тока (УПТ).

Такое решение обеспечило исключение длинных волноводных линий и, самое главное, вращающихся волноводных соединений, что позволило уменьшить как ожидаемые, так и спорадические потери, и как следствие — снижение чувствительности. Соединение СВЧ и НЧ блоков осуществлялось коаксиальными кабелями.

Конструктивно низкочастотная часть была выполнена в виде шкафа модульной конструкции. Для каждого из каналов использовался отдельный конструктивный модуль. Аналогично выполнялись модули стабилизаторов питания. Вспомогательные цепи и цепи управления были объединены в один блок.

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

Управление антенной системой осуществлялось с помощью отдельного блока управления. Для индикации положения антенны применялись сельсины, изначально заложенные в конструкцию СОН-4. Контроль положения антенны по углу места и азимуту осуществлялся с помощью круглых шкал, закреплённых на осях соответствующих сельсинов.

Для оценки интенсивности осадков использовался стандартный пювниограф П-2, дополненный резистивным датчиком. Изменение постоянного напряжения, обусловленное изменением положения ротора потенциометра, по линии связи передавалось на УПТ, выход которого подключался к самописцу. Была проведена условная калибровка модернизированного пювниографа, позволившая установить взаимосвязь изменения положения поплавка прибора при дождях различной интенсивности и сигнала на выходе УПТ.

Затем система была дополнена приёмопередатчиком самолётной РЛС РОЗ-1. Блок был закреплён на «противовесе» антенной колонки (рис.3). Такое расположение блока обеспечивало лучшую балансировку антенной системы, создавая дополнительный противовес более крупногабаритной и ощутимо более тяжёлой (в сравнении с исходной антенной СОН-4 с диаметром 1,8 м и «не сплошной» рабочей по-

верхностью) применяемой в комплексе антенне. Соединение с индикатором кругового обзора (ИКО) и управляющими элементами осуществлялось с помощью коаксиальных кабелей. Рупор (облучатель) располагался в плоскости фокуса ортогонально рупорам радиометров, так, как показано на рис. 5. Соединение с рупором обеспечивалось с помощью волноводной линии без вращающихся соединений.

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

Трассовая установка для измерения ослабления радиоволн в дожде

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 изменения как спектра капель в дожде, так и угла их наклона. Известно, что при одной и той же интенсивности изменение характера распределения капель по размерам (спектра капель) может менять величину затухания таким образом, как будто существенным образом изменилась интенсивность дождя. С целью получения данных о реальном затухании волны и была построена трассовая система.

Анализ известной на тот момент литературы, посвящённой исследованию ослабления радиоволн в атмосфере при различных условиях, показал, что большинство работ было посвящено оценкам замирания на линиях связи. Поскольку для таких измерений актуальной была задача получения полной оценки затухания вдоль линии связи, без учёта простран-

ственного зондирования осадков, для проведения измерений выбирались трассы длиной более 1000 м. Для выполнения работ использовалась аппаратура систем связи.

Проведённые оценочные расчёты для случайной эффективной высоты слоя осадков 1500 м и ширины ДН на уровне половинной мощности $1^{\circ}50'$ показали, что для данных условий средняя длина трассы должна быть равна 167 м.

Поскольку ослабление в дожде пропорционально, в том числе, длине трассы, очевидно, что на коротких трассах необходима более чувствительная измерительная аппаратура. Необходимо было учитывать, что погрешности измерений, вызванные изменением мощности зондирующего сигнала или уходом частоты, могут быть соизмеримы с измеряемым ослаблением в дождях малой интенсивности. Для обеспечения уверенной регистрации ослаблений в дождях малой интенсивности необходимо увеличить эффективную длину трассы и осуществлять синхронное сопоставление излучаемой мощности с мощностью, принимаемой приёмником.

Этим условиям наиболее соответствовала схема с использованием двухкратного прохождения трассы. Такое решение соответствовало применению системы активно-пассивного типа, построенной по принципу систем ближней радиолокации с частотной модуляцией, что обеспечивает использование в качестве источника излучаемого сигнала и сигнала гетеродина одного генератора — отражательного клистрона, модулируемого по частоте. Пределы изменения амплитуды модулирующего напряжения были выбраны таким образом, чтобы обеспечить работу клистрона в режиме непрерывной генерации с девиацией частоты менее 5 МГц. Для упрощения схемного построения использован модулирующий сигнал не пилообразной прямоугольной формы, как это делалось чаще всего, а синусоидальной, что не сказывалось существенным образом на работе схемы, поскольку при таких измерениях ослабления сигнала интерес представляет не

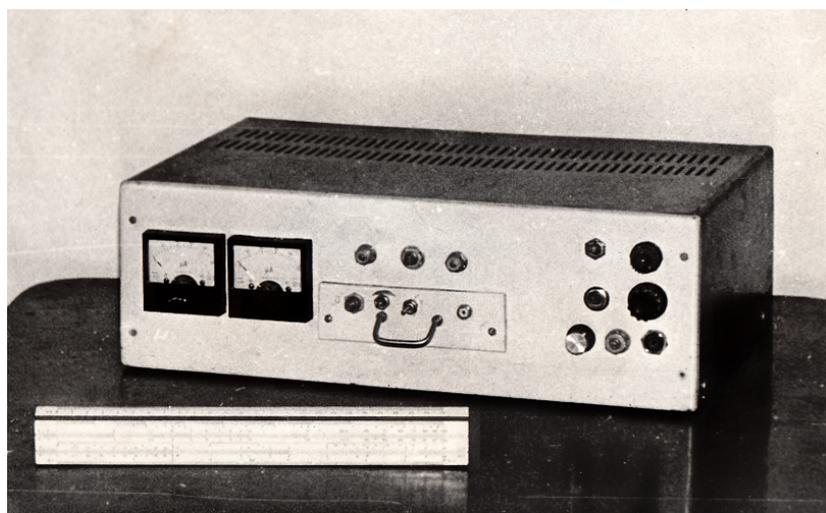


Рис. 6. Блок управления одним из каналов трассового измерителя

ляло характер изменения сигнала при прохождении через трассу с осадками.

Конструктивно трассовые установки разбиты на две части. СВЧ часть устанавливалась непосредственно на поворотном устройстве вместе с параболической антенной. Элементы управления и обработки сигналов, а также блок питания для этих модулей конструктивно были выполнены в виде за-

амплитуда принятого (отражённого) сигнала, а пределы её изменения. Да к тому же при такой длине трассы обеспечивается большой запас по мощности.

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 опреде-

конченного блока (НЧ часть), который входил в совокупность управляющего оборудования комплекса (рис. 6).

Измерительная трасса была сформирована между двумя зданиями, расположенными на расстоянии более 150 м друг от друга. Поворотные устройства с антеннами и СВЧ частью размещались под крышей технического этажа главного корпуса института (рис.7), что обес-

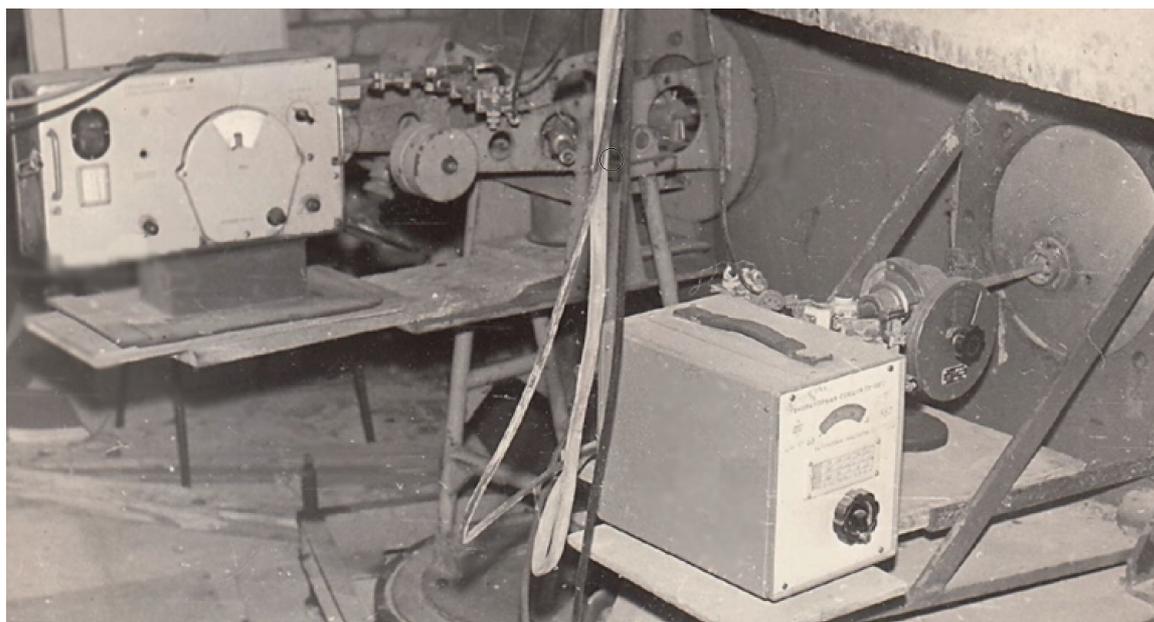


Рис. 7. Размещение СВЧ части трассовых установок под крышей технического этажа

печивало защиту от прямого попадания дождя на поверхность зеркала антенны. В качестве приёмо-передающих антенн использовались параболические антенны диаметром 1 м на волне 1,6 см и 0,6 м на волне 0,8 см, что обеспечивало ширину ДН на уровне половинной мощности $\approx 1^\circ$. Расположение облучателей рупорного типа обеспечивало проведение измерений на горизонтальной поляризации [6].

Поскольку никаких ограничений по габаритам в данном случае не имелось, для построения СВЧ части использовались стандартные СВЧ генераторы и аттенюаторы, ферритовые циркуляторы и прочие СВЧ элементы. Усилители строились по той же схеме, что и в радиометрах.

Отражатель, в качестве которого использовался уголкоый элемент с длиной ребра 0,6 м, был установлен на углу близлежащего здания, на парапете (здание имеет плоскую крышу). Расстояние между антеннами и отражателем – 170 м. И приёмо-передающая часть, и уголкоый отражатель располагались на высоте порядка 15 метров.

Для сопоставления полученных результатов по интенсивности осадков проводилась простейшая верификация по результатам оценки интенсивности по модернизированному плювиографу П-2.

Как показали испытания созданной трассовой установки обеспечивалось измерение изменения величины затухания сигнала на уровне не менее 0,05 дБ.

Управление радиометерологическим комплексом

Созданный комплекс, включающий СВЧ-радиометры, радиолокатор, трассовую установку и плювиограф, был установлен на главном корпусе Муромского института. Антенная система с установленными радиометрами и РЛС показана на рис. 3. Трассовая установка (со стороны СВЧ части) представлена на рис. 7. Аппаратура, обеспечивающая необходимую обработку и представление результатов измерений, управление работой комплекса, а также используемые для работы систем блоки питания размещалась в одной из лабораторий

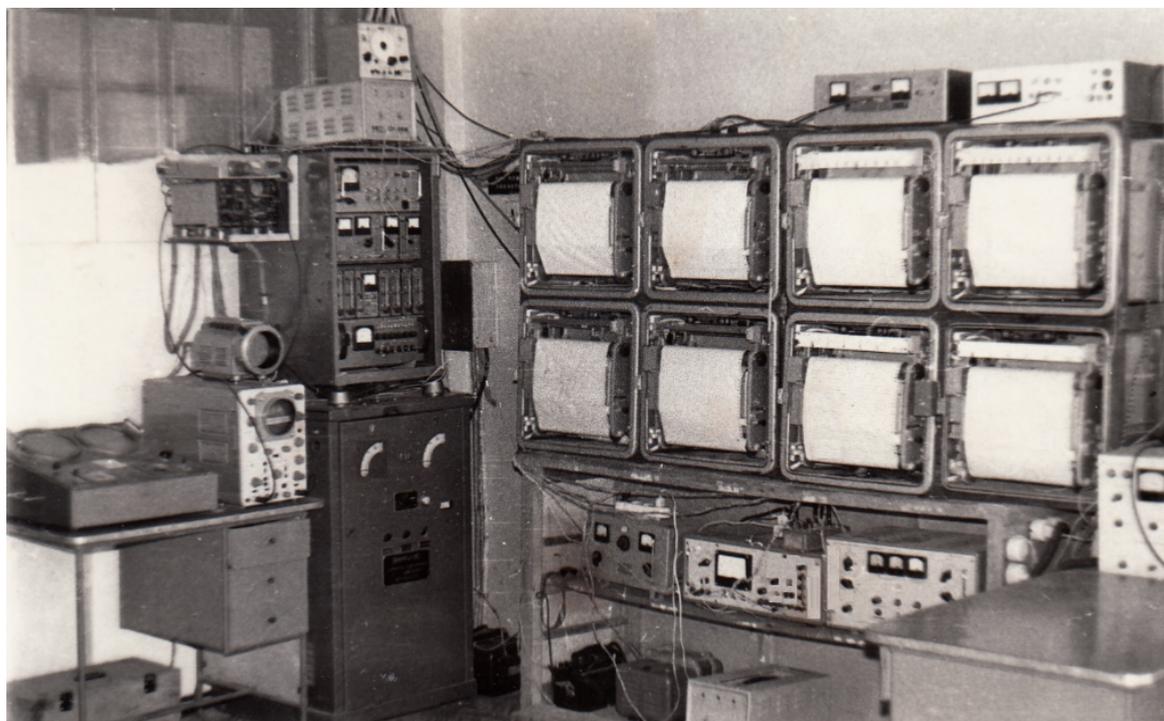


Рис. 8. Оборудование управления и обработки информации

верхнего этажа (рис. 8).

Как видно из фото, регистрация результатов измерений по всем каналам (кроме данных РЛС) осуществлялась на бумажных носителях с использованием самопишущих потенциометров ЭПП-09. Контроль высоты облачности по данным РЛС осуществлялся с использованием ИКО и осциллограммы в горизонтальной развёртке.

Для связи между лабораторией и зоной установки антенны при проведении юстировочных или профилактических работ использовался армейский полевой телефон ТАИ-43.

Сопутствующие работы и разработки

Представленный обзор не может отразить весь объём выполненных в тот период работ. За пределами рассмотрения остались работы по разработке и особенностям выполнения радиометрической измерительной аппаратуры для Института океанологии. Разработанный комплект многоканального приёмника предназначался для установки и проведения измерений в морских условиях с борта одного из научно-исследовательских судов.

Особенности морских и океанических условий накладывали жёсткие ограничения по совокупности граничных условий, начиная от тактико-технических (чувствительность, стабильность параметров и т.п.) и заканчивая эксплуатационными (высокая влажность с повышенным содержанием соли, ударные и вибрационные воздействия в условиях шторма и т.д.). Учёт этих особенностей требовал повышения эксплуатационной надёжности системы, применения более сложных схемотехнических и конструкторских решений.

Создание радиометрической аппаратуры для установки на борту самолёта-лаборатории ИЛ-18Д «Циклон» также требовало решения методических вопросов, связанных с обеспечением возможности проведения радиометрических измерений с борта самолёта-лаборатории [7], а также учёта таких требований, как высокая чувствительность и стабильность параметров, малогабаритность, вибро- и

удароустойчивость, термостабилизация. Естественно, сочетание таких граничных условий существенно усложняло работы, требовало поиска новых подходов и решений.

Важной и значимой была работа по оценке влияния слоя осадков на поверхности антенны на точность измерения радиояркостной температуры. Проведённые измерения позволили установить, что погрешность определения поглощения без учёта смачивания антенны может быть более 20%. Был предложен способ обработки данных измерений с введением предварительной калибровки антенны по искусственному дождю известной интенсивности, который позволял уменьшить такие погрешности до 2–3,5% [8].

В работах по созданию СВЧ-радиометрического комплекса принимали участие преподаватели, сотрудники и студенты Радиотехнического факультета института: Мартяшин Я.И., Желтышев К.Л., Самсонов А.В., Смутьский А.Д., Костров В.В., Софьин В.С., Сергеев Н.Н., Соловьёв Л.П., Миронов А.Ф., Гинеотис С.П., Первушин Р.В., Николаев В.А., Булкин В.В., Катышев В., Горячкин Е., Будкин А., Тимаков Н., Мальченко С., Малышев Ю., Ермаков Л., Горшков В., Гришаков А., Курников А., и другие.

Итоги первого этапа работ

Вся совокупность работ по созданию радиометрического комплекса, кратко может быть выражена следующим обобщённым итогом:

1. Разработан радиотехнический комплекс в составе четырёхканального радиотелескопа на длины волн 0,8; 1,35; 1,6; 3,2 см и двухканальной трассовой аппаратуры на длины волн 0,8 и 1,6 см, который позволял проводить исследования облачной атмосферы с интегральной водностью до 5–7 кг/м².

2. В составе объединённого СВЧ радиометрического комплекса, состоящего из четырёх приёмников, впервые был создан двухволновый радиометр на длины волн 1,35–1,6 см, в котором обеспечивалось противофазное под-

ключение приёмников к антенне и эквивалентам узлом модуляции, состоящим из трёхплечного ферритового Y-переключателя и двух Y-циркуляторов. Применение такого радиометра позволило уменьшить габариты, упростить схему, повысить точность измерений за счёт совмещения в пространстве диаграмм направленности этих каналов.

3. Впервые предпринятое совмещение наземных радиотеплокационных измерений и непосредственных измерений ослабления радиоволн в дожде на короткой приземной трассе дало возможность не только повысить точность определения водосодержания облаков с осадками, но и провести оценку мелко-масштабной структуры интегральной водности облаков и осадков, эквивалентной высоты и интенсивности дождя [9, 10].

4. Разработанный радиотехнический комплекс в составе четырёхканального радиотелескопа обеспечивал чувствительность по радиояркостным температурам на уровне 0,5–1 К.

5. Для реализации измерений ослабления радиоволн в дожде в составе радиотехнического комплекса была разработана трассовая аппаратура, за основу построения которой принята схема двухкратного прохождения трассы. Реализованная двухканальная установка позволяла обнаружить изменение уровня принимаемого сигнала на трассе длиной 170 м на 0,05 дБ.

6. Проведённый анализ методических и аппаратурных погрешностей радиометрических измерений облачной атмосферы, и оценка влияния смачивания антенны на абсолютные измерения позволили разработать способ обработки с введением предварительной калибровки антенны по искусственному дождю известной интенсивности, который позволял уменьшить погрешность определения поглощения с 20 до 2–3,5%.

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

Литература

1. Фалин В.В. Радиотехнический комплекс для зондирования облаков и осадков. Дис. ... кандидата технических наук. Муром, 1980. 170 с.
2. Степаненко В.Д., Щукин Г.Г., Бобылев Л.П., Матросов С.Ю. Радиотеплокация в метеорологии. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 283 с.
3. Фалин В.В. Радиометрические системы СВЧ. М.: Луч, 1997. 440 с.
4. Калашиников 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.
5. Урядов А.А., Боровинский Б.А., Борин С.Ф., Калашиников В.В., Фалин В.В. Построение широкополосных усилителей на транзисторах / Тезисы докладов научно-технической конференции МИ ВЗМИ. Владимир: 1974. С. 56–57.
6. Фалин В.В. К вопросу выбора поляризации в измерениях в дожде на горизонтальной трассе при интерпретации радиотеплового излучения облаков с осадками / Депонированные рукописи. 1981. № 8. М.: ВИНТИ, 1981. 11 с.
7. Горелик А.Г., Калашиников В.В., Кашин А.А., Ратьков В.М., Трубников Б.Н., Фалин В.В. О возможности определения интенсивности дождя с летательных аппаратов СВЧ радиометрическим методом / Труды XI Всесоюзной конференции по распространению радиоволн. Казань: Издательство Казанского университета, 1975. С. 140–142.
8. Фалин В.В., Гинеотис С.П., Николаев В.А., Булкин В.В. Влияние смачивания антенны на измерения радиотеплового излучения // Методы активной и пассивной радиолокации в метеорологии. Труды ГГО, 1985. Вып. 490. С. 100–102.
9. Костров В.В., Фалин В.В., Николаев В.А. Исследования микроструктуры осадков по поляризационным измерениям // Межведомственное содействие по распространению ультракоротких радиоволн и электромагнитной совместимости (тезисы докладов). Улан-Удэ: 1983. С. 120–122.
10. 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.

Поступила 23 марта 2022 г.

English

RADIOMETEOROLOGICAL RESEARCH IN MUROM INSTITUTE: MICROWAVE RADIOMETRIC SYSTEM

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: ggschukin@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: vvbulkin@mail.ru

Elena Valeryevna Fedoseeva — Grand Dr. in Engineering, Professor, Radio Engineering 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: rostockin.ilya@yandex.ru

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

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

Abstract: The first stage of radiometeorological research performed in Murom Institute of VLSU is reviewed. Research work was started by assistant lecturer V.V. Falin in the early 70s of the twentieth century. Radiometric equipment under development was intended for appropriate head research institutions. Stationary microwave radiometric system for radiometeorological atmospheric research was made further to field tests. System core comprised four-channel receiver operating on wavelengths 0.8; 1.35; 1.6 and 3.2 cm. The microwave part was made as a separate cylindrical-shaped structural element placed in focal plane of parabolic antenna so that receive horns are in focal area. Fan and heating element were used to control thermal parameters of microwave element's operation. Receiver's distinctive feature was development of two-wave radiometer (wavelengths are 1.35 and 1.6 cm) operating in one feedhorn (input horn). Specific feature of this radiometer is modulation unit organized as active-passive ferrite system comprising three-side switch and two Y-circulators, incorporated between switch's output sides and two receivers' inputs. 2.5 m diameter antenna system was located on the roof of technical floor of the institute main building. ROZ-1 radar transceiver was installed in antenna system to monitor cloud level, which additionally served as antenna's position counterbalance. Control equipment was located in the laboratory of the upper floor of the building. Route system was developed to measure radio waves attenuation in precipitations. Route system base is 170 m, operating wavelengths are 0.8 and 1.6 cm. Data is presented on features of developed equipment and related research.

Keywords: radiothermal atmospheric radiation, radiometeorological systems, microwave-radiometric system, attenuation of radio waves in precipitations, pattern function.

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

References

1. Falin V.V. Radio engineering complex for sounding clouds and precipitation. Dis. ... Candidate of Technical Sciences. Murom, 1980. 170 p.
2. Stepanenko V.D., Shchukin G.G., Bobylev L.P., Matrosov S.Yu. Radioteplolocalion in meteorology. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1987. 283 p.
3. Falin V.V. Radiometric microwave systems. Moscow: Luch, 1997. 440 p.

4. *Kalashnikov V.V., Trubnikov B.N., Falin V.V.* Radio engineering complex for the study of moisture content and water content of the atmosphere. Proceedings of the All-Union Symposium on Radiophysical studies of the Atmosphere. Leningrad: Hydrometeorological Data, 1977. Pp. 216–222.
5. *Uryadov A.A., Borovinsky B.A., Borin S.F., Kalashnikov V.V., Falin V.V.* Construction of wide-band amplifiers on transistors. Abstracts of reports of the MI VZMI scientific and technical conference. Vladimir: 1974. Pp. 56–57.
6. *Falin V.V.* On the choice of polarization in measurements in rain on a horizontal track when interpreting radiothermal radiation of clouds with precipitation. Deposited manuscripts. 1981. No. 8. Moscow: VINITI, 1981. 11 p.
7. *Gorelik A.G., Kalashnikov V.V., Kashin A.A., Ratkov V.M., Trubnikov B.N., Falin V.V.* Possibilities of determining the intensity of rain from microwave aircraft by radiometric method. Proceedings of the XI All-Union Conference on Radio Wave Propagation. Kazan: Kazan University Press, 1975. Pp. 140–142.
8. *Falin V.V., Gineotis S.P., Nikolaev V.A., Bulkin V.V.* The effect of antenna wetting on measurements of radiothermal radiation. Methods of active and passive radar in meteorology. Proceedings of the GGO, 1985. Issue 490. Pp. 100–102.
9. *Kostrov V.V., Falin V.V., Nikolaev V.A.* Studies of precipitation microstructure by polarization measurements. Interdepartmental meeting on the propagation of ultrashort radio waves and electromagnetic compatibility (abstracts). Ulan-Ude: 1983. Pp. 120–122.
10. *Falin V.V., Kostrov V.V., Nikolaev V.A., Gineotis S.P.* Identification of rains by attenuation and radiation of microradiowaves in orthogonal planes. XIV All-Union Conference on the propagation of radio waves, Leningrad, 1984. Abstracts of reports. Moscow: Nauka. 1984. Pp. 24–25.