

Дистанционное зондирование сред

DOI 10.24412/2221-2574-2023-4-5-10

УДК 621.396.96

ИЗМЕРЕНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ДОЖДЕЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИМИ СРЕДСТВАМИ

Первушин Радислав Валентинович

кандидат технических наук, доцент, доцент Муромского института (филиала)
ФГБОУ ВО «Владимирский Государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых».

E-mail: pervushin55_55@mail.ru

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

Аннотация: Дистанционное наблюдение за параметрами атмосферы стало насущной необходимостью нашего времени. Показано, что при комплексном исследовании дождевых облаков радиотехническими средствами возникает необходимость контролировать ослабление радиоволн в осадках. Это позволяет повысить точность измерения радиотеплового излучения облачных образований, исключив радиотепловое излучение осадков, и сопоставлять водность дождевых облаков и количество осадков. Для осуществления подобных измерений предложен измеритель затуханий радиоволн в осадках на короткой трассе. Определена оптимальная длина трассы исходя из параметров антенной системы многоканального радиотеплолокационного комплекса и средней интенсивности дождей в регионе. Измеритель представляет собой радиотехнический прибор, построенный по принципу систем ближней радиолокации с пассивным ответом. Для формирования пассивного ответа использован уголкового отражатель. Особенностью прибора является использование одного СВЧ генератора для формирования зондирующего сигнала и сигнала для смесителя супергетеродинного приёмника. Это достигается применением линейной частотной модуляции СВЧ генератора. На выходе смесителя получается низкочастотный сигнал, что облегчает последующую его обработку. Приведена структурная схема измерителя с описанием его функционирования. Обсуждаются результаты натурального эксперимента измерителя, проведённые в составе радиометеорологического комплекса. Значение средней водности дождевого облака, в процессе эксперимента, достигало $4,87 \text{ г/м}^3$, а средняя водность дождя доходила до значения $2,63 \text{ г/м}^3$. Таким образом, относительная водность дождя составляет 54% от средней водности облака. Предложен способ дальнейшего усовершенствования комплекса.

Ключевые слова: дождевые облака; интегральное влагосодержание атмосферы; интенсивность дождя; радиотепловое излучение; радиотелескоп; ближняя радиолокация; линейная частотная модуляция.

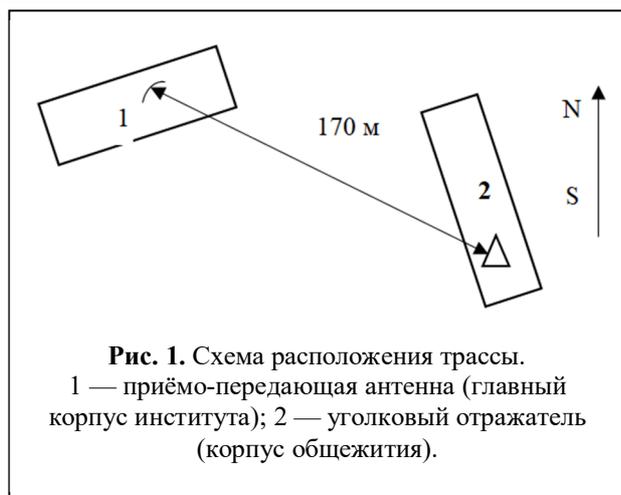
Введение

Дистанционное зондирование атмосферы радиолокационными методами позволяет определять многие параметры атмосферы на значительных площадях и различных уровнях высот. Для решения ряда задач, связанных, прежде всего, с оценкой интегрального влагосодержания облачных образований, был разработан комплекс радиометрических приёмников [1]. Измеряемое ими радиотепловое излучение атмосферных образований позволяет оценивать влагосодержание облаков и прогнозировать формирование дождевых облаков и интенсивность дождя в исследуемой области. Однако, на точность измерений радиоизлучения облачных образований существенно влияют потери

мощности сигнала (ослабление) на участке его прохождения от облака до радиолокационного комплекса. Существенную роль в ослабление вносят потери сигнала в осадках, особенно в ливневых дождях. Для оценки этих ослаблений была разработана аппаратура, позволяющая осуществлять их измерение на приземной трассе.

Система измерения

Трассовые измерения проводились ранее с целью прогнозирования возможных замираний радиосигналов на линиях связи, вызванных выпадением осадков [2]. В этой ситуации пространственное распределение интенсивности осадков существенного значения не имеет, по-



сколькo интерес вызывает полное ослабление на линии связи, поэтому для проведения измерений выбирались трассы длиной более 1000 м и применялась аппаратура, характерная для линий связи.

В рассматриваемом методе необходимо учитывать вклад дождя в измеряемое излучение в объёме луча диаграммы направленности антенны радиотелескопа. Площадь поперечного сечения диаграммы направленности параболической антенны определяется выражением

$$S_{\text{дн}} = \pi (\sin(\theta) \cdot h_{\text{эф}})^2,$$

где θ — половина ширины диаграммы направленности; $h_{\text{эф}}$ — эффективная высота слоя осадков.

Из теории распространения волн следует, что электромагнитное поле в раскрыве параболической антенны содержится в эллипсоиде вращения с размером большой оси L и малой оси $\sqrt{\lambda L}$. Приравняв площадь горизонтального сечения эллипсоида

$$S_s = \frac{\pi}{4} L \sqrt{\lambda L}$$

площади сечения диаграммы направленности, можно получить выражение для нахождения длины горизонтальной трассы

$$L = \sqrt[3]{\frac{16}{\pi} (\sin(\theta) \cdot h_{\text{эф}})^4}.$$

Отсюда следует, что, при наиболее типовом значении $h_{\text{эф}} = 1500$ м и существующей антенне с диаграммой направленности $\theta = 0,55^\circ$,

средняя длина трассы составит примерно 170 м. Поскольку ослабление в дожде пропорционально длине трассы, то, очевидно, для проведения исследований осадков на короткой трассе потребуется создание более высококачественной специальной аппаратуры, так как погрешность измерений, вызванная изменением мощности излучения и уходом частоты передатчика, могут быть соизмеримы с измерениями ослабления в дождях малой интенсивности. Для обеспечения уверенной регистрации ослаблений в дождях малой интенсивности необходимо увеличивать эффективную длину трассы и осуществлять синхронный контроль излучаемой мощности и мощности , принимаемой приёмником.

Данным требованиям наиболее удовлетворяет схема трассы, использующей двукратное прохождение трассы радиосигналом с пассивным отражателем, построенной по принципу систем ближней радиолокации с частотной модуляцией. В таких системах в качестве передатчика передающей части системы и гетеродина приёмной части (приёмника) используется, как правило, один СВЧ генератор, допускающий возможность частотной модуляции.

Схема расположения подобной системы представлена на рис. 1. Сигнал СВЧ диапазона излучается антенной, расположенной на главном корпусе института в направлении уголкового отражателя, установленного на дальнем углу корпуса общежития. Сигнал, отражённый от уголкового отражателя, возвращается на антенну системы. Таким образом, электромагнитная волна проходит двойной путь.

Важное значение уделено выбору амплитуды модулирующего сигнала. Это обусловлено требованиями СВЧ генератора, в качестве которого выбран клистронный генератор. Данный прибор имеет ограниченные возможности по увеличению девиации, так как происходит выход генератора за пределы устойчивой генерации. В соответствии с техническими условиями, устойчивая генерация генератора осуществляется при $\Delta F < 7$ МГц. Для уменьшения

влияния паразитной амплитудной модуляции в генератор введена система автоматического поддержания амплитуды.

Структурная схема приёмо-передающей части представлена на рис. 2.

СВЧ-генератор 1, в качестве которого применён стандартный генератор сигналов, выполненный на отражательном клистроне и настроенный на среднюю частоту 18,75 ГГц, является задающим. Генератор имеет возможность внешней частотной модуляции, которая осуществляется с помощью модулирующего генератора 6. Далее, сформированный сигнал поступает на делитель мощности 2, основная мощность с которого через ферритовый циркулятор 3 и прецизионный аттенуатор 4 поступает на антенну, а часть мощности входящего сигнала ответвляется в гетеродинный тракт.

Антенна излучает сфокусированный в виде луча СВЧ-сигнал в пространство по направлению к уголкового отражателю, находящемуся на другом конце трассы (см. рис. 1). Падающий на уголкового отражатель луч отражается строго в обратном направлении и, следовательно, попадает на антенну 5 в качестве принимаемого. Принятый антенной сигнал через прецизионный аттенуатор 4 и ферритовый циркулятор 3, а далее — через фазовращатель 8 поступает на информационный вход балансного смесителя 9. В качестве гетеродинного сигнала на смеситель поступает часть сигнала с делителя мощности 2, прошедшего через аттенуатор 7, которым выставляется уровень гетеродинного сигнала, определяющий режим работы диодов смесителя.

В качестве модулирующего использован сигнал, изменяющийся по закону прямоугольной пилы с периодом T_m . Так как между сигналами, поступающими на смеситель, образуется фазовая задержка, обусловленная задержкой

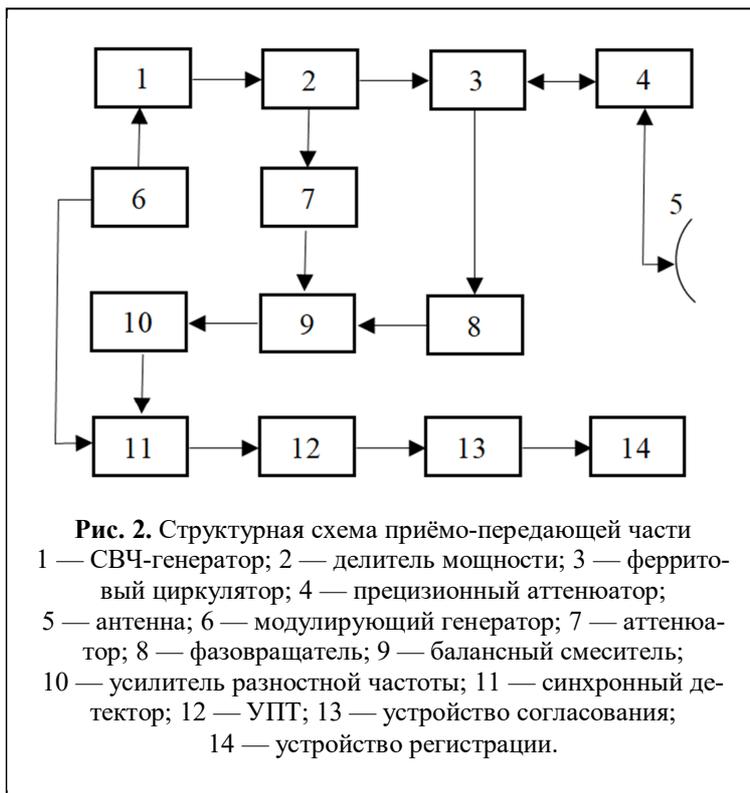


Рис. 2. Структурная схема приёмо-передающей части
 1 — СВЧ-генератор; 2 — делитель мощности; 3 — ферритовый циркулятор; 4 — прецизионный аттенуатор; 5 — антенна; 6 — модулирующий генератор; 7 — аттенуатор; 8 — фазовращатель; 9 — балансный смеситель; 10 — усилитель разностной частоты; 11 — синхронный детектор; 12 — УПТ; 13 — устройство согласования; 14 — устройство регистрации.

принятого сигнала на время, необходимое для прохождения сигналом трассы в прямом и обратном направлении, то на выходе смесителя формируется сигнал с разностной частотой

$$F_p = \frac{\Delta F}{T_m} \tau = \frac{2\Delta F}{c \cdot T_m} r = \frac{\Delta F \cdot f_m}{c},$$

где ΔF — девиация частоты генератора СВЧ; τ — время задержки отражённого сигнала; r — расстояние до отражателя; c — скорость света; T_m — период модулирующего сигнала; f_m — частота модулирующего сигнала

При параметрах системы $\Delta = 5$ мГц, $f_m = 1$ кГц и $r = 170$ м, разностная частота будет, соответственно, $F_p = 5,667$ кГц. Следовательно, в качестве усилителя разностной частоты может быть использован УПТ. Далее усиленный сигнал поступает на синхронный детектор 11, который наряду с выделением огибающей, осуществляет бланкирование поступающего на детектор сигнала на время обратного хода модулирующего сигнала. Затем сигнал последовательно проходит УПТ 12, устройство согласованиям 13 и поступает на устройство регистрации 14.

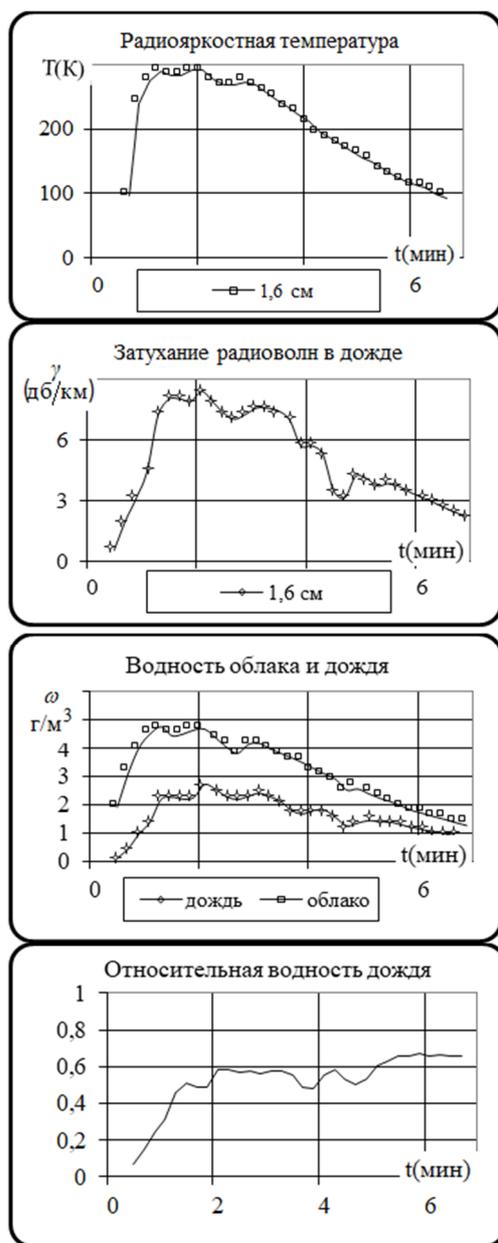


Рис. 3. Результаты измерений

Ферритовый циркулятор 3 осуществляет развязку между передаваемым и принимаемым сигналами. Прецизионный аттенюатор 4 позволяет осуществлять калибровку системы с высокой точностью. Введение ослабления в тракт осуществляется как для передаваемого сигнала, так и для принимаемого, что соответствует прохождению радиосигнал по трассе в прямом и обратном направлении.

Конструктивно система выполнена из двух частей:

- СВЧ-часть, смонтированная на поворотной механической платформе, в которую входят: СВЧ-генератор 1; делитель мощности 2; ферритовый циркулятор 3; прецизионный аттенюатор 4; антенна 5; аттенюатор 7; фазовращатель 8; балансный смеситель 9;

- НЧ-часть, выполненная в виде законченного блока, в которую входят: модулирующий генератор 6; усилитель разностной частоты 10; синхронный детектор 11; УПТ 12; устройство согласования 13.

Поворотная платформа, с установленными на ней элементами, устанавливалась на техническом этаже главного корпуса перед слуховым окном, которое закрывается радиопрозрачным материалом. Поворот антенной системы в двух плоскостях позволяет направить максимум диаграммы направленности на уголкового отражатель, расположенный на дальнем углу крыши общежития.

Результаты измерений

По результатам проведённых измерений и обработки реализации зондирования дождевого облака с выпадением дождя над зоной, изображённой на рис. 1, были построены графики, приведённые на рис. 3. На первом графике представлено распределение радиояростной температуры на волне 1,6 см, позволяющее оценить водность дождевого облака в объёме луча диаграммы направленности приёмной антенны СВЧ радиометра, которая располагается в непосредственной близости от приёмопередающей антенны трассовой установки. На втором графике приведено ослабление радиоволны 1,6 см в дожде, измеряемое описываемой системой. На третьем графике приведены результаты расчётов средней водности в мощных кучево-дождевых облаках, рассчитанной по методике, изложенной в [3], и водности дождя, определяемой по графикам, приведённым в [4].

Максимальная средняя водность дождя доходила до значения $2,63 \text{ г/м}^3$, при средней водности облака $4,87 \text{ г/м}^3$, что составляет 54% от средней водности в облаках. Отношение водности дождя к средней водности в пределах одного облака изменяется незначительно. Малые значения относительной водности в начальный период могут объясняться естественными временными несоответствиями начала прохождения облака в зоне радиотеплолокатора и приближением осадков к поверхности земли в районе расположения трассового измерителя.

Заключение

Проведённые измерения указывают на отсутствие однозначной связи между водозапасом, средней водностью системы облако-дождь и водностью дождя. Для дальнейшей работы по установлению взаимосвязи между указанными параметрами необходимо создание более сложных комплексов по исследованию систем облако-дождь [5]. Причём, эти комплексы должны включать как традиционные измерительные приборы, применяемые в метеорологии, так и приборы дистанционного зондирования, использующие, например, радиотехнические принципы. Взаимное дополнение информации от приборов этих двух групп позволит уменьшить погрешность измерения отдельных показателей. Для увеличения достоверности получаемой информации в рассмат-

риваемый комплекс необходимо добавить активный канал, который должен строиться на основе радиолокатора метеорологического назначения, что позволит уточнить распределение водности системы облако-дождь по направлению зондирования. Особое внимание следует уделить совершенствованию пассивно-активного комплекса в плане обеспечения электромагнитной совместимости между каналами.

Литература

1. Фалин В.В. Радиометрические системы СВЧ. М.: Луч, 1997. 440 с.
2. Шукин 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 (46). С. 5–19.
3. Фалин В.В. Радиотехнический комплекс для зондирования облаков и осадков: дис. ... канд. техн. наук. Муром, 1980. 170 с.
4. Баширинов А.Е., Гуревич А.С., Егоров С.Т. Радиоизлучение Земли как планеты. АН СССР. Институт физики атмосферы. М.: Наука, 1974. 187 с.
5. Первушин Р.В. Пассивно-активные радиотехнические средства контроля метеорологических параметров: дис. ... канд. техн. наук. Владимир, 2007. 156 с.
6. Шукин 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(47). С. 5–17.

Поступила 20 сентября 2023 г.

English

MEASURING RAIN INTENSITY USING RADIO EQUIPMENT

Radislav Valentinovich Pervushin — PhD, Associate Professor, Murom Institute (Branch) Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education “Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletovs”.

E-mail: pervushin55_55@mail.ru

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

Abstract: It is shown that radio wave attenuation in precipitation must be controlled during a comprehensive research of rain clouds using radio equipment. This enables to improve measurement accuracy of thermal radio radiation of cloud formations and to correlate liquid-water content in rain clouds and precipitation amount. The radio wave attenuation meter along the path is proposed to perform such measurement. The optimum path length is defined in view of antenna system parameters of radiothermal detection equipment and rain intensity in the area. The meter is a radio device based on short-range radar systems with passive

response. It features the use of one microwave generator for a probing signal and a signal for the mixer. This is achieved by using linear frequency modulation of the microwave generator. The meter's block diagram is presented with its operation description. Test results of the meter as part of a radiometeorological system are discussed.

Keywords: rainy clouds; integral moisture content in the atmosphere; rain intensity; radiothermal radiation; short-range radar detection; path length; microwave generator; linear frequency modulation.

References

1. *Falin V.V.* Microwave radiometric systems. Moscow.: Luch, 1997. 440 p.
2. *Shukin G.G., Bulkin V.V., Fedoseeva E.V., Rostokin I.N.* Radiometeorological research at the Murom Institute: microwave radiometric complex. Radioengineering and telecommunication systems. 2022. No 2(46). Pp. 5–19.
3. *Falin V.V.* Radio engineering complex for cloud and precipitation sensing: thesis ... cand. tech. sciences. Murom, 1980. 170 p.
4. *Basharinov A.E., Gurevich A.S., Egorov S.T.* Radio emission of the Earth as a planet. AS USSR. Institute of Atmospheric Physics. Moscow: Nauka, 1974. 187 p.
5. *Pervushin R.V.* Passive-active radio engineering means of monitoring meteorological parameters: thesis ... cand. tech. sciences. Vladimir, 2007. 156 p.
6. *Shukin 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(47). Pp. 5–17.