

УДК: 621.396.96

DOI: 10.26907/rwp29.2025.476-479

## МНОГОЧАСТОТНЫЕ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ МИКРОВОЛНОВЫЕ РАДИОМЕТРИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОБЛАЧНОЙ АТМОСФЕРЫ

И.Н. Ростокин<sup>1</sup>, Е.В. Федосеева<sup>1</sup>, Г.Г. Щукин<sup>2</sup>, Е.А. Ростоккина<sup>1</sup>,

И.Ю. Холодов<sup>1</sup>, М.А. Матюков<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>Муромский институт (филиал) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых», 602264, г. Муром, ул. Орловская, 23

E-mail: rostokin.ilya@yandex.ru

<sup>2</sup>АО «Государственный научно-исследовательский навигационно-гидрографический институт (АО «ГНИНГИ») 199106, Санкт-Петербург, Кожеевская линия, 41,

E-mail: ggshchukin@mail.ru

**Аннотация.** Микроволновые радиометрические системы являются одним из основных инструментов дистанционного зондирования атмосферы, обеспечивая измерения температуры, влажности, концентрации облачных частиц и других параметров. В докладе представлены результаты экспериментальных исследований поляризационных характеристик радиотеплового излучения облачной атмосферы с осадками, полученные с помощью многочастотной микроволновой радиометрической системы, принимающей радиотепловое излучение на четырех длинах волн 0.8 см, 1.35 см, 3.2 см и 7.5 см при угле возвышения зеркальной антенны 30°.

**Ключевые слова:** дистанционное зондирование атмосферы; многочастотные микроволновые радиометрические системы; радиотепловое излучение, поляризация, опасные атмосферные метеоявления.

## MULTI-FREQUENCY POLARISATION MICROWAVE RADIOMETRIC STUDIES OF THE CLOUDY ATMOSPHERE

I.N. Rostokin, E.V. Fedoseeva, G.G. Shchukin, E.A. Rostokina,

I.Yu. Kholodov, M.A. Matyukov

**Abstract.** Microwave radiometric systems are one of the main tools for remote sensing of the atmosphere, providing measurements of temperature, humidity, cloud particle concentration and other parameters. The paper presents the results of experimental studies of polarization characteristics of radio-thermal radiation of cloudy atmosphere with precipitation obtained with the help of a multi-frequency microwave radiometric system receiving radio-thermal radiation at four wavelengths 0.8 cm, 1.35 cm, 3.2 cm and 7.5 cm at an elevation angle of the mirror antenna of 30°.

**Keywords:** remote sensing of the atmosphere; multi-frequency microwave radiometric systems; radio-thermal radiation, polarization, dangerous atmospheric meteorological phenomena.

### Введение

Микроволновые радиометрические системы позволяют получать оперативную информацию об изменениях состояния окружающей среды по измеряемому уровню собственного радиошумового излучения исследуемой области пространства, что определяет перспективность развития методов и аппаратуры микроволновых радиометрических измерений для дистанционного зондирования физических сред [1].

Важными вопросами, решаемыми при разработке микроволновых радиометрических систем, являются вопросы расширения функциональных возможностей путем перехода к многочастотным измерениям и вопросы снижения зависимости результатов измерений от условий функционирования системы при решении задач повышения точности и стабильности работы систем.

Микроволновые радиометрические исследования позволяют дистанционно в оперативном режиме оценивать физические параметры природных сред по интенсивности их радиошумового излучения в строго определенных частотных диапазонах [2].

Переход к многочастным радиометрическим измерениям позволяет повысить информативность радиометрических систем и точность оценки физических параметров природных сред.

Для измерения метеопараметров атмосферы с различной облачной структурой необходимо выполнять прием радишумового излучения в нескольких частотных диапазонах. Поэтому построение многочастотных микроволновых радиометрических систем является перспективным направлением развития аппаратуры дистанционного зондирования атмосферы.

### Техника эксперимента

Вариант структурной схемы многочастотной микроволновой радиометрической системы дистанционного зондирования атмосферы, с использованием элементов радиофотоники в тракте передачи промежуточной частоты, представлен на рис. 1.

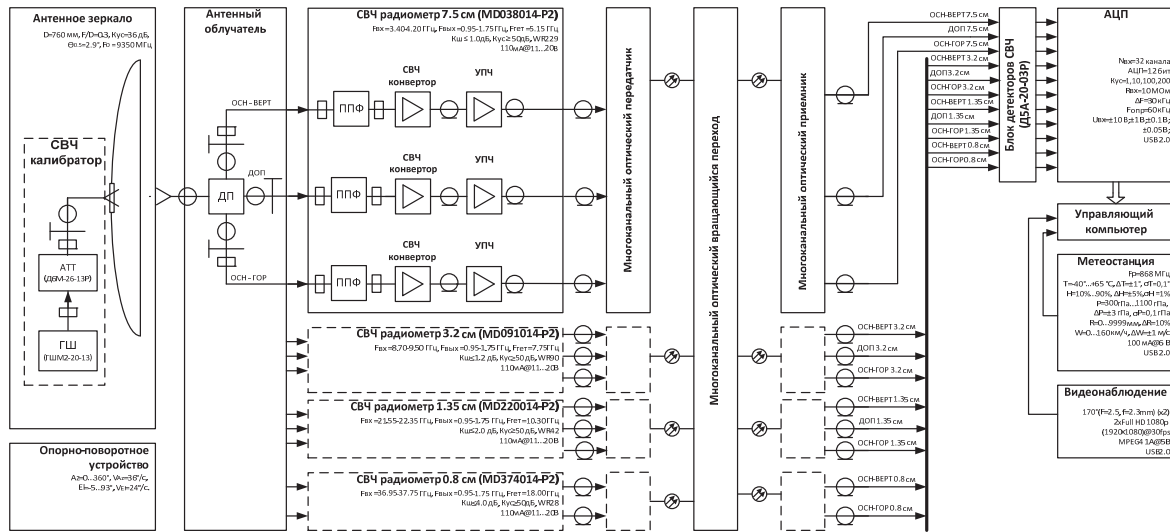


Рис. 1. Структурная схема многочастотной микроволновой радиометрической системы

Наличие двух основных измерительных каналов, принимающих радиотепловое излучение облачной атмосферы на двух ортогональных линейных поляризациях (горизонтальная и вертикальная) позволит производить оценку поляризационных характеристик радиотеплового излучения гидрометеоров атмосферы, что составляет основу дистанционного контроля интенсивности осадков, параметров распределения капель дождя по размерам, параметров пространственной структуры слоя дождя [3].

На выходах антенного устройства каждого измерительного канала формируются три выходных шумовых сигнала, которые при условии абсолютной поляризационной развязки измерительных каналов и изотропности радишумового излучения, принимаемого из области рассеяния ДН основного антенного канала определяются следующими выражениями:

- выходной сигнал основного канала при приеме на горизонтальной поляризации

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

- выходной сигнал основного канала при приеме на вертикальной поляризации

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

- выходной сигнал дополнительного антенного канала

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

При условии конечной поляризационной развязки между основными каналами ортогональных линейных поляризаций, характеризуемой коэффициентом взаимной передачи  $k_{\text{пр}}$ , выходные сигналы определяются выражениями

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

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

разностный сигнал оценки поляризационного контраста равен

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

Реализация в антенне многочастотной микроволновой радиометрической системы трехканального приема по двум основным измерительным на вертикальной (V) и горизонтальной (H) поляризациях и дополнительному каналу ( $\Delta$ ) на общее зеркало антенны определяет условия компенсации влияния фоновых шумов на результаты измерений с возможностью оценки поляризационных контрастов [4].

### Интерпретация результатов и их анализ

В данном разделе приведены результаты комплексных экспериментальных исследований пространственно-временной изменчивости радиотеплового излучения облачной атмосферы с осадками, выполненные с помощью разработанного микроволнового радиометрического метеоконкомплекса, в период формирования неблагоприятных метеорологических явлений, связанных с развитием мощных конвективных облаков, гроз, ливней, а также в период прохождения мощных атмосферных фронтов.

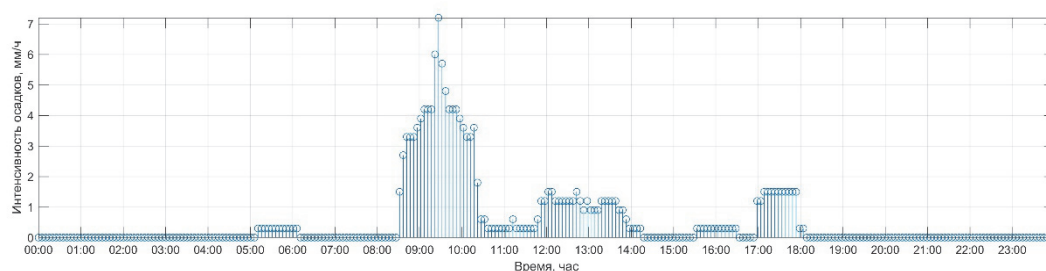


Рис. 2. Интенсивность выпадающих осадков, мм/ч

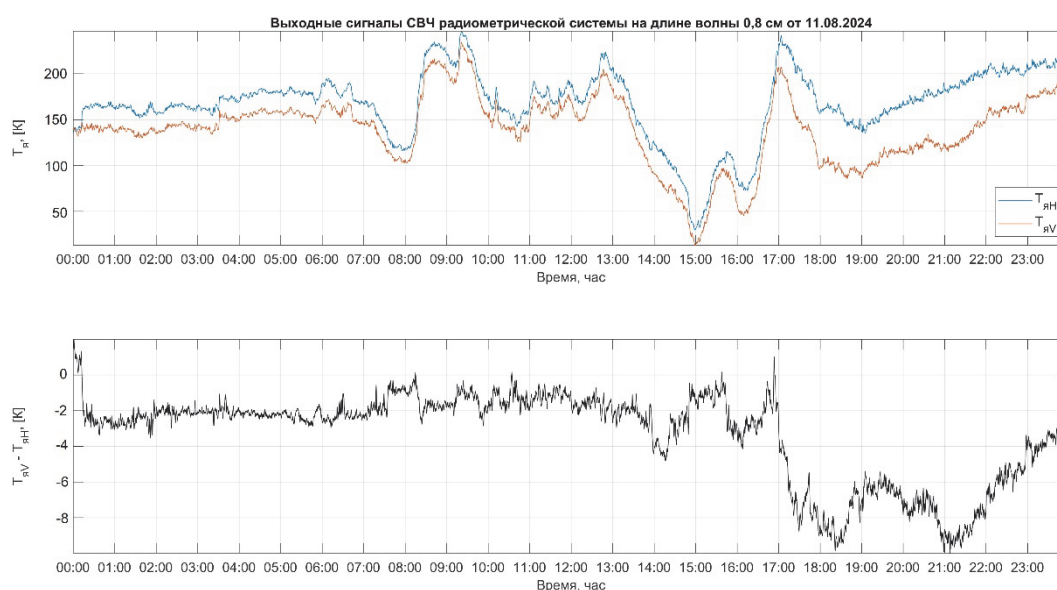
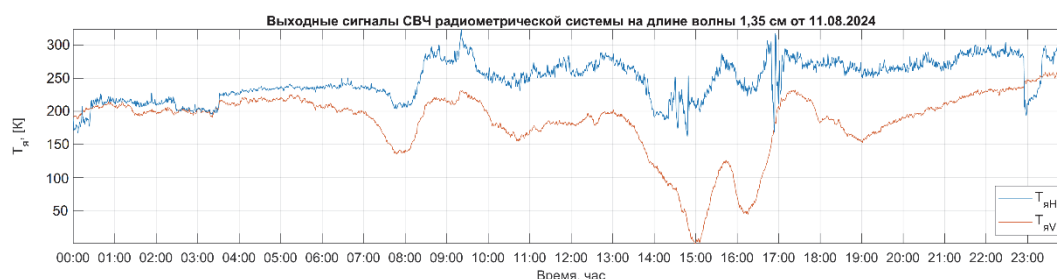


Рис. 3. Результаты поляризационных исследований радиотеплового излучения атмосферы с осадками на длине волны 0.8 см



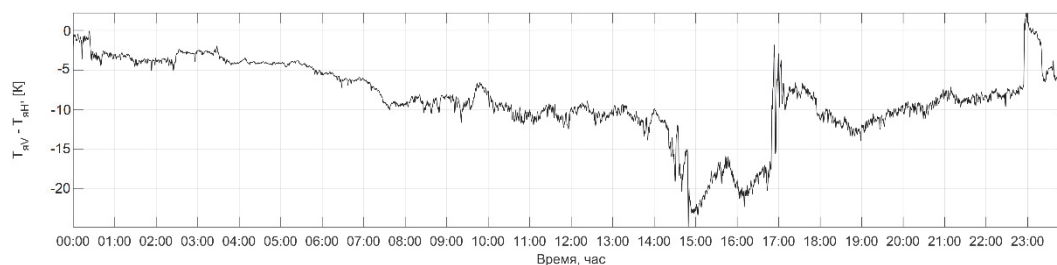


Рис. 4. Результаты поляризационных исследований радиотеплового излучения атмосферы с осадками на длине волны 1.35 см.

Наличие двух основных измерительных каналов, принимающих радиотепловое излучение облачной атмосферы на двух ортогональных линейных поляризациях (горизонтальная и вертикальная) позволит производить оценку поляризационных характеристик радиотеплового излучения гидрометеоров атмосферы, что составляет основу дистанционного контроля интенсивности осадков, параметров распределения капель дождя по размерам, параметров пространственной структуры слоя дождя.

Реализация в антенне многочастотной микроволновой радиометрической системы трехканального приема по двум основным измерительным на вертикальной (V) и горизонтальной (H) поляризациях и дополнительному каналу ( $\Delta$ ) на общее зеркало антенны определяет условия компенсации влияния фоновых шумов на результаты измерений с возможностью оценки поляризационных контрастов.

### Заключение

Перспективы совершенствования методов микроволнового радиометрического контроля атмосферы связаны с потребностью в развитии информационного обеспечения сверхкраткосрочного прогноза погоды и опасных метеоявлений, связанных с развитием конвективных облаков и выпадающих из них осадков.

Применение многочастотных методов микроволнового радиометрического контроля атмосферы позволяет более эффективно контролировать структуру облака на различных стадиях его развития, более достоверно контролировать выпадающие из облаков осадки при больших интенсивностях, когда коротковолновые каналы могут достигать насыщения, то длинноволновые измерительные каналы позволяют эффективно продолжать измерения.

Применение поляризационных многочастотных методов микроволнового радиометрического контроля атмосферы позволяет более эффективно решать задачу раздельного определения мелкокапельной и крупнокапельной фракции частиц облаков и осадков, с целью оперативного контроля интенсивности выпадающих из облаков осадков.

### Список литературы

1. Радиотеплолокация в метеорологии / В.Д. Степаненко, Г.Г. Щукин, Л.П. Бобылев, С.Ю. Матросов. – Л.: Гидрометеиздат, 1987. – 283 с.
2. Козлов А.И., Логвин А.И., Сарычев В.А. Поляризация радиоволн. – Кн. 3. Радиополяриметрия сложных по структуре сигналов. – М.: Радиотехника, 2008. – 688 с.: ил. (Сер. Поляризация радиоволн. Редактор А.И. Козлов.)
3. Федосеева Е.В., Щукин Г.Г., Ростокин И.Н. Калибровка трёхдиапазонной сверхвысокочастотной радиометрической системы с компенсацией фоновых шумов. // Измерительная техника. – 2020. – № 4. – С. 44–50.
4. Федосеева Е.В., Ростокин И.Н., Щукин Г.Г. Многочастотные СВЧ-радиометрические исследования неоднородной атмосферы // Метеорология и гидрология. – 2022. – № 12. – С. 78–87.