

УДК 621.396.67

Результаты моделирования параметров устройств системы калибровки многодиапазонного СВЧ радиометрического комплекса дистанционного зондирования атмосферы

Федосеева Е.В., Писный А.С.

В статье приводятся результаты моделирования параметров устройств системы калибровки радиометрической метеорологической системы РМС посредством использования современных программ: CST Studio Suite 2019 и DS SIMULIA Antenna Magus 2024. Представлена структурная схема РМС с описанием основных её блоков. Приведены результаты расчета S-параметров многомодового облучателя зеркальной антенны СВЧ радиометрической системы.

Ключевые слова: РМС радиометрическая метеорологическая система, СВЧ радиометрический комплекс, моделирование, ГШ генератор шума, рефлекторная антенна, ММО многомодовый облучатель.

Введение

Радиометеорология – это междисциплинарная наука, которая исследует взаимодействие радиоволн с атмосферными явлениями. Методы пассивного зондирования атмосферы в СВЧ-диапазоне позволяют получать информацию о температуре и влажности атмосферы, водности облаков и осадках. Она сочетает в себе элементы радиотехники, метеорологии и физики, что позволяет глубже понять процессы, происходящие в атмосфере, и их влияние на распространение радиоволн.

Радиометеорология применяется в следующих областях:

- Метеорологические исследования, подразумевающие изучение структуры и динамики атмосферы, а также для прогнозирования неблагоприятных метеорологических явлениях, таких как ураганы, торнадо и т.д.;
- Климатическое моделирование, позволяющее создавать модели климата, которые учитывают влияние радиоволн на атмосферу;
- Радиометеорология играет важную роль в обеспечении надежной связи и навигации в различных областях, таких как авиация, морское сообщение – кораблей следующих по торговым транзитным путям и т.д.;
- Экологический мониторинг для изучения обстановки и предупреждения о загрязнении окружающей среды;

- Мониторинг уровня воды в реках, озерах и морях, а также предупреждения о наводнениях и других гидрологических явлениях;

- Космические исследования. Радиометеорология помогает изучать атмосферу других планет и спутников, а также влияние радиоволн на космические объекты.

В современном мире, где связь, прогнозирование погодных явлений и навигация имеют ключевое значение в различных сферах, радиометеорология приобретает особую актуальность. Благодаря радиометеорологическим исследованиям можно улучшить качество метеорологических прогнозов, оптимизировать работу радиотехнических систем, а также решать задачи в области экологии, гидрологии и природопользования, что является одним из важных направлений дистанционного зондирования окружающей среды. [1, 2].

Целью работы является моделирование отдельных устройств системы калибровки многодиапазонного СВЧ радиометрического комплекса дистанционного зондирования атмосферы, для оценки параметров в зависимости от распространения электромагнитных волн.

Для достижения цели данной работы необходимо решить следующие задачи:

- изучить возможности современных программ по созданию моделей СВЧ систем;
- разработать модель ГШ и зеркальной антенны в программе схемотехнического моделирования CST Studio Suite 2019;

- спроектировать конический гребенчатый рупор для блока ГШ, в программе DS SIMULIA Antenna Magus 2024;

- исследовать влияние геометрических параметров антенного устройства (рефлектора), различных частотных зависимостей параметров на передачу энергии в соответствующих модах;

- проанализировать коэффициент передачи на всех модах и сделать вывод о сохранении соотношений между сигналами основного и дополнительных канала антенны в широком диапазоне частот.

СВЧ радиометрическое дистанционное зондирование атмосферы предполагает измерение ее собственного радиотеплового излучения, создаваемого на входе антенны и преобразуемого в шумовой сигнал на входе радиометрической метеорологической системы (РМС).

Оценка метеопараметров по результатам СВЧ радиометрических измерений, основана на применении полуэмпирических моделей, в основе которых регрессионные соотношения взаимосвязи с радиояркостью температурой - интегральной характеристикой интенсивности излучения в микроволновом диапазоне [3]. Исходя из этого, для решения задач оценки метеопараметров атмосферы по данным микроволновой радиометрии необходимо выполнение калибровки СВЧ радиометрических систем - нахождение однозначного соответствия величины выходного сигнала системы, и радиояркостью температуры исследуемой области [2,4]. Для реализации моделирования системы использована программа CST Studio Suite 2019.

Компьютерное моделирование является одним из наиболее эффективных методов изучения различных систем. Суть данного метода заключена в получении количественных и качественных результатов на основе имеющейся математической модели электронного устройства. К основным этапам компьютерного моделирования относятся:

- определение объекта моделирования и постановка задачи;
- выявление основных элементов системы;

- планирование и проведение компьютерных экспериментов;
- анализ результатов.

Исследование модели РМС

При выполнении исследования в качестве трёхмодовой антенны РМС применили зеркальную параболическую антенну (рис. 1), основные характеристики которой приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристики параболической антенны радиотеплолокационной системы

ХАРАКТЕРИСТИКА	ЗНАЧЕНИЕ
Диаметр зеркала, мм	1000
Фокусное расстояние F , мм	312
Ширина диаграммы направленности, $\square q_{0,5}$	1,5°
Коэффициент усиления, дБ	40
Тип облучателя	Круглый волновод (С блока ГШ)
Рисунок	1



Рис. 1. - Антенное устройство радиотеплолокационной системы для лабораторных испытаний

При работе СВЧ радиометрической системы в нескольких частотных диапазонах необходимо обеспечить формирование и

принятие сигнала калибровки в широкой полосе частот, включающей все рабочие диапазоны частот [5].

Исходя из вышеуказанных требований, в качестве источника шумового сигнала принят модуль СВЧ генератора шума на ЛПД М31305-4 6Ш 2.210.121ТУ (Основные характеристики внутреннего ГШ представлены в таблице 2.). В программе модуль ГШ реализован как конический гребенчатый рупор. Для принятия сигнала в широком диапазоне частот задействована модель многомодового облучателя (рис. 3) настроенного на частоты 4, 9,375 и 22 ГГц.

Таблица 2 – Основные технические характеристики внутреннего ГШ

ХАРАКТЕРИСТИКА	ЗНАЧЕНИЕ
Частотный диапазон, см	3,2
Спектральная плотность мощности шума, не менее дБ	33
Неравномерность уровня СПМШ, не более дБ	2
КСВН тракта	1,2

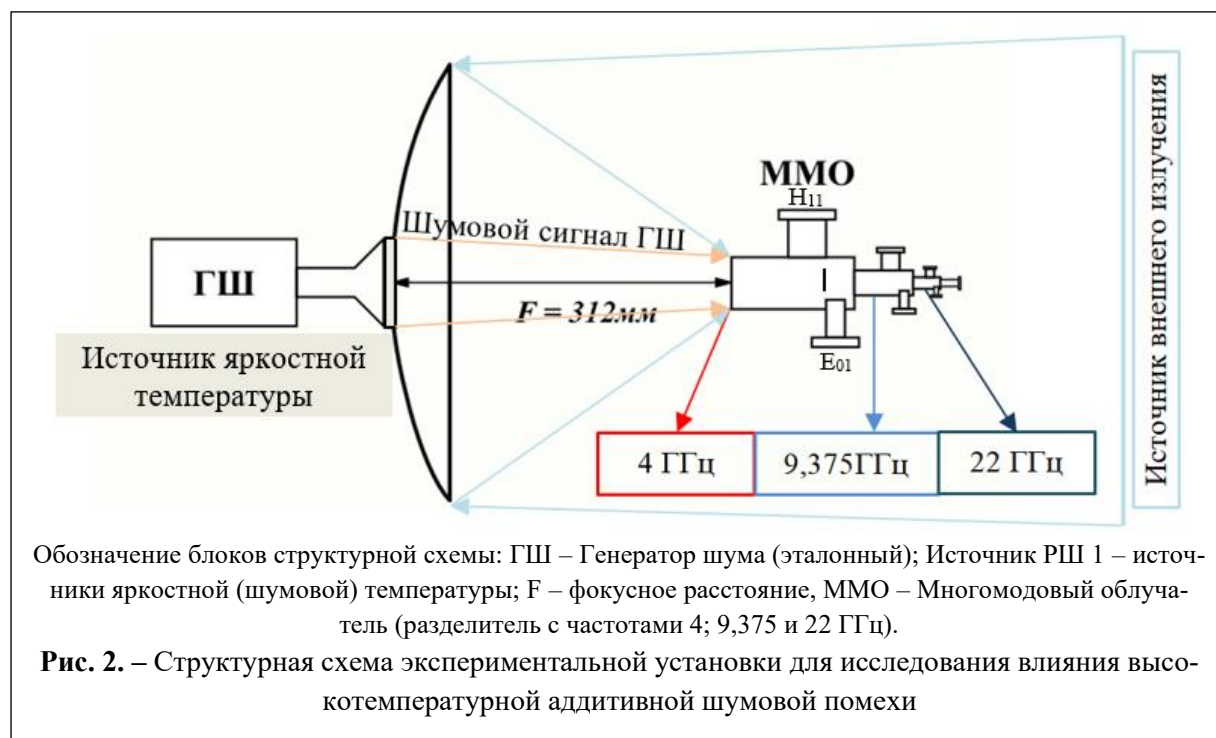
Структурная схема системы калибровки многодиапазонного СВЧ радиометрического комплекса дистанционного зондирования атмосферы приведена на рис. 2. Данная схема включает в себя: радиометр (приёмное

устройство), зеркало (рефлекторная антенна), источник ради шумового сигнала (блок ГШ) и регистрирующее устройство в виде многомодового облучателя.

Обоснование выбора модели системы

Устройство основывается на решениях, применяемых при разработке компенсационных методов повышения помехозащищенности различного типа радиосистем связи. С помощью дополнительного антенного канала с меньшей направленностью организуется приём излучения по помехонесущему направлению с последующим решением задач компенсации в приёмнике радиосистемы.

Так как исследование и анализ способов компенсации внешних и внутренних шумов показало перспективность двухканальной радиометрической системы с дополнительным каналом формирования сигнала компенсации фоновых шумов с возможностью оперативного перехода в режим пилот-сигнала при проведении измерений в условиях формирования слоя осадков на поверхности зеркала антенны, для моделирования использовали эту систему [6]. Далее произведена реализация модели в программе.



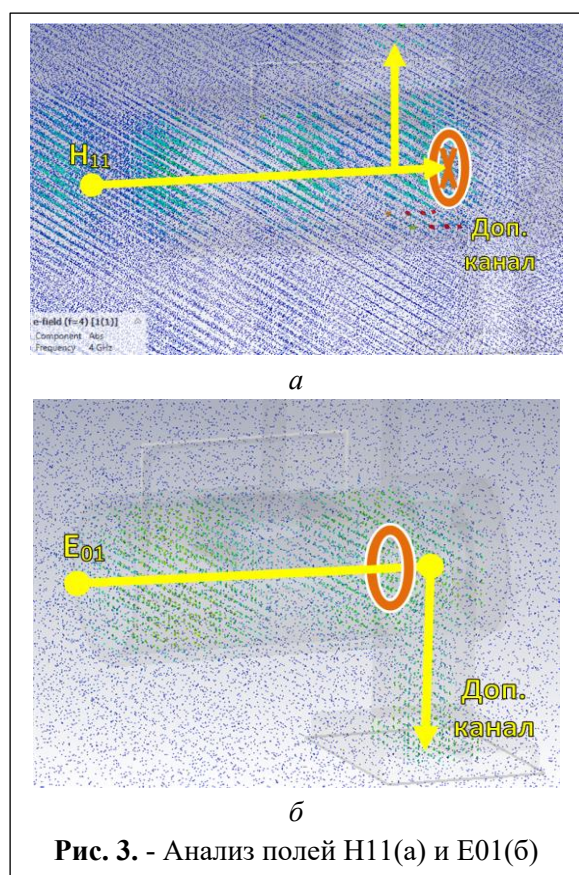


Рис. 3. - Анализ полей H_{11} (а) и E_{01} (б)

Моделирование антенного устройства

Выполненное электродинамическое моделирование позволило получить изображения полей волн распространяющихся в разделителе ММО (в области 4 ГГц, рис. 3). На рис. 3а,б показаны электрические поля волн H_{11} (а) и E_{01} (б). Анализ представленных графических изображений полей позволяет сделать вывод о выполнении своего функционального назначения режекторным кольцом – изоляции дополнительного канала от волны H_{11}

(рис.3а), в то время как волна E_{01} проходит его без существенных отражений (рис.3б).

Результаты моделирования S параметров многомодового разделителя двуканальной антенны СВЧ радиометрической системы, (при влиянии внешнего источника излучения отражённого от зеркала параболической антенны представленной на рис.5) осуществляющей измерения интенсивности радиощумового излучения в диапазоне, средняя частота которого равна 4 ГГц, приведены на рис.4.

Выполнено моделирование характеристик прохождения волн H_{11} и E_{01} в многомодовом разделителе в программе CST Studio Suite 2019.

В результате были получены частотные зависимости S – параметров (рис. 4): S_1 - относительного коэффициента передачи на моде H_{11} с входа круглого волновода на выход прямоугольного волновода основного антенного канала и относительного коэффициента передачи на моде E_{01} с входа круглого волновода на выход прямоугольного волновода дополнительного антенного канала; S_2 - относительного коэффициента передачи между выходами прямоугольных волноводов - развязка между указанными выходами (в скобках (3)..(1) указаны номера мод в волноводах).

Результаты моделирования

Анализ представленных частотных зависимостей показал, что передача энергии на соответствующих модах на выходы

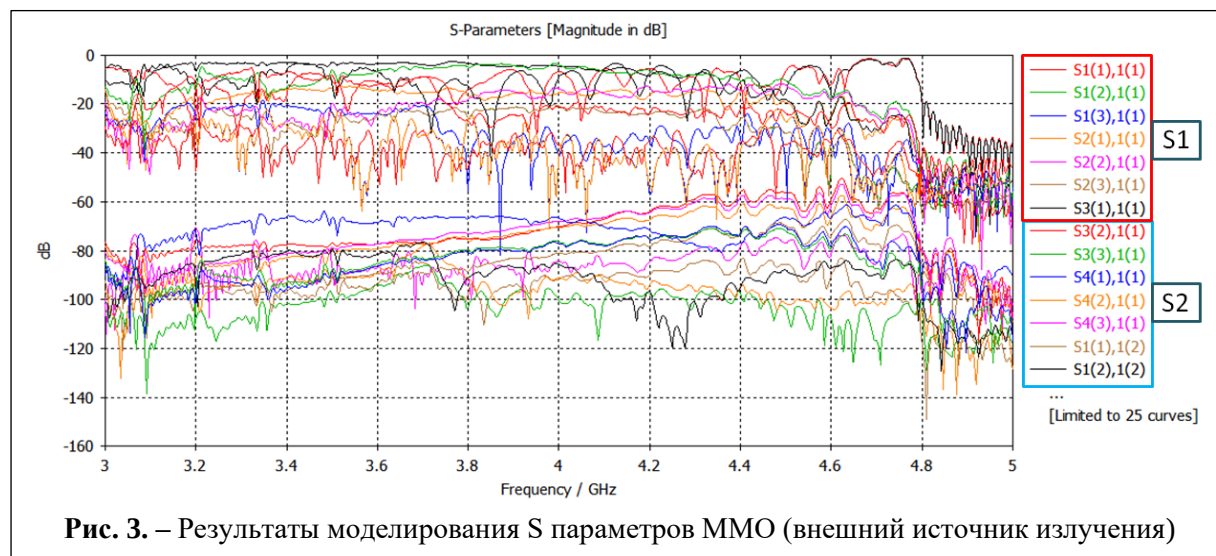


Рис. 3. – Результаты моделирования S параметров ММО (внешний источник излучения)

многомодового разделителя в области высоких частот (ВЧ) характеризуется общим понижением коэффициента передачи на всех модах, что позволяет сделать вывод о сохранении соотношений между сигналами основного и дополнительных каналов двухканальной антенны в достаточно широком диапазоне частот. Величина развязки между выходными каналами разделителя сохраняется на уровне не более -58 дБ во всем рассматриваемом диапазоне от 3 ГГц до 5 ГГц.

Полученные данные по параметрам многомодового разделителя позволяют сделать вывод об отсутствии ограничений со стороны данного устройства на реализацию способа выделения полезного сигнала радиотеплолокационной системы путем формирования дополнительного сигнала в трёхканальной двухмодовой антенне [6,7].

Дополнительно были выполнены исследования в диапазонах: от 7,375 до 11,375 ГГц (с центральной частотой 9,375 ГГц) и в диапазоне от 21 до 23 ГГц (с центральной частотой 22 ГГц).

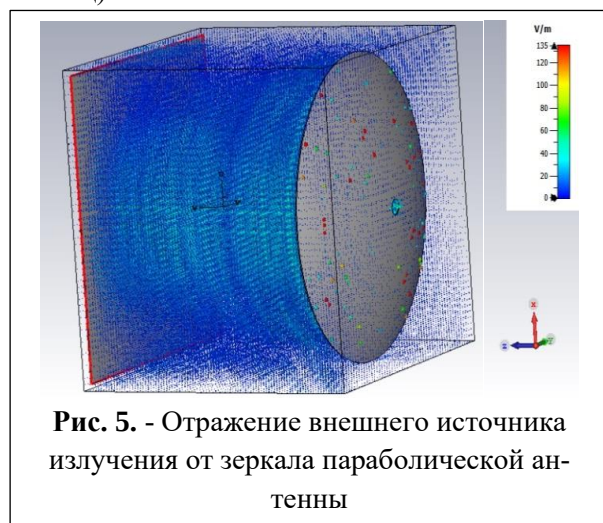


Рис. 5. - Отражение внешнего источника излучения от зеркала параболической антенны

Выбор способа калибровки системы РМС

Важным вопросом дистанционного зондирования СВЧ радиометрическими системами окружающей среды является выбор и реализация способа их калибровки. Данная процедура позволяет установить однозначное соответствие между уровнем выходного сигнала и величиной радиояркостной температуры исследуемой области пространства.

Полная калибровка системы предполагает наличие в области зондирования калиброванного источника шумового сигнала, что труднореализуемо при наземном базировании СВЧ радиометрической системы, т.к. она предполагает наличие в дальней зоне антенны широкоапертурного высокостабильного источника шумового сигнала. Кроме того, для мобильных систем дистанционного зондирования необходимо обеспечить возможность периодического выполнения калибровки в произвольных условиях базирования.

Исходя из вышеперечисленных требований принято решение калибровать СВЧ радиометрическую систему с помощью эталонного, высокостабильного, источника излучения (ГШ), создающего относительно равномерное по мощности излучение шумового сигнала. Особенностью метода калибровки заключается в том, что ГШ находится при определенной температуре, и поэтому измеряемая энергия в отличие от радиолокации выражается в виде эквивалентной температуры излучения [8]. При этом основное преимущество способа калибровки с применением внешнего генератора состоит в возможности её выполнения в произвольных условиях наземного базирования СВЧ радиометрической системы [9].

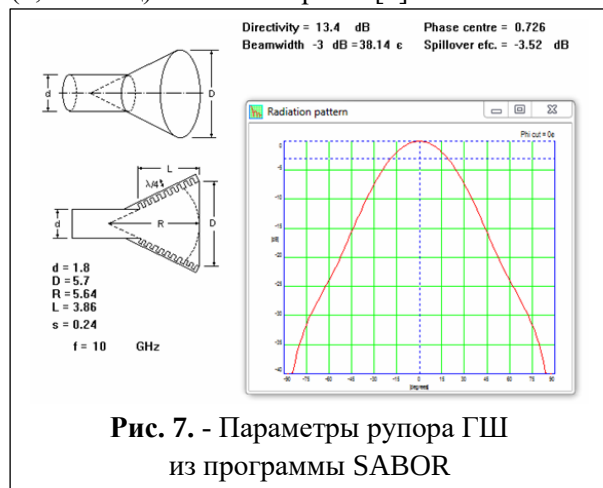
В качестве эталонного шумового сигнала аддитивного шума (шум с фиксированным уровнем) вводился радишумовой сигнал от генератора шума (источник радишумового излучения), направление прихода которого соответствовало главному лепестку ДН антенны. Таким способом имитируется наличие в ближней боковой угловой области ДН антенны эквивалентного по уровню радишумового излучения объекта.

Для обеспечения введения в антенно-фидерный тракт сигнала от генератора шума к его выходу должен быть подсоединен рупор, который устанавливается в отверстии в центре зеркала СВЧ радиометрической системы. Для получения двух калиброванных отсчетов шумовой сигнал от генератора шума проходит через аттенуатор с регулируемым ослаблением 3дБ. На рис. 6 представлена

структурная схема внешнего источника шумового сигнала для калибровки СВЧ радиометрической системы, который содержит генератор шума ГШ, аттенуатор АТ и волноводный переход ВП.



Для реализации рупора в DS SIMULIA Antenna Magus 2024, использовались параметры из программы SAVOR и ДН конического рупора для рабочих диапазонов частот РМС. Пример расчёта для частоты 10 ГГц (9,375 ГГц) показан на рис.7 [5].



Заключение

В работе были получены следующие результаты:

- изучены возможности современных программ по созданию моделей СВЧ систем;
- разработана модель ГШ и зеркальной антенны в программе схмотехнического моделирования CST Studio Suite 2019;
- получены изображения полей волн в ММО;
- спроектирован конический гребенчатый рупор для блока ГШ, в программе DS SIMULIA Antenna Magus 2024;
- исследованы влияния геометрических параметров антенного устройства (рефлектора),

различных частотных зависимостей на передачу энергии в соответствующих модах (при внешнем воздействии);

- проанализирован коэффициент передачи на всех модах и сделан вывод о сохранении соотношений между сигналами основного и дополнительных каналах антенны в диапазоне частот (4 ГГц).

Литература

1. Радиотеплокация в метеорологии / В. Д. Степаненко, Г. Г. Щукин, Л. П. Бобылев, С. Ю. Матросов. – Л.: Гидрометеиздат, 1987. – 283 с.
2. Фалин В. В. Радиометрические системы СВЧ / В. В. Фалин. – М.: Луч, 1997. – 440 с.
3. Ware R.A. A multichannel radiometric profiler of temperature, humidity, and cloud liquid // Radio Science. 2003. 38, 4, 8079.
4. Yong Han, Westwater Ed R. Analysis and Improvement of Tipping Calibration for Ground-Based Microwave Radiometers // IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, vol. 38, no.3, PP. 1260-1276.
5. Оценка чувствительности многодиапазонной СВЧ радиометрической системы зондирования атмосферы. Федосеева Е.В., Ростокин И.Н., Щукин Г.Г.
6. Федосеева Е.В. Результаты электродинамического моделирования модового разделителя двухканальной антенны СВЧ радиометрической системы // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2014. – №2. – С.24 – 29.
7. Федосеева Е.В., Федосеев А.А. Исследование диапазоновых свойств модового разделителя двухканальной антенны СВЧ радиотеплокационной системы // "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" (КрыМиКо 2014)/ 24-я Международная Крымская конференция / Материалы конф. – Севастополь: Вебер, 2014. – С.519 – 520.
8. Микроволновая радиометрия термической стратификации атмосферы / Кадыгров, Е. Н. — Москва, б.и., 2020. – 272 стр.
9. Оценка условий реализации внешнего источника сигнала калибровки для многодиапазонной СВЧ радиометрической системы / Федосеева, Е. В., Ростокин, И. Н., Щукин, Г. Г., Ростокина, Е. А. // РТС. – 2021. – №3. – С. 13-22.

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 23-29-10114 (<https://rscf.ru/project/23-29-10114/>)

Поступила 14 октября 2024 г.

The article presents the results of modeling the parameters of the devices of the RMS radiometric meteorological system calibration system using modern programs: CST Studio Suite 2019 and DS SIMULIA Antenna Magus 2024. A block diagram of the RMS with a description of its main blocks is presented. The results of calculating the S-parameters of a multimode irradiator of a microwave mirror antenna of a radiometric system are presented.

Keywords: RMS radiometric meteorological system, microwave radiometric complex, simulation, GS noise generator, reflex antenna, MMO multimode irradiator.

Писный Артём Сергеевич – магистрант Муромского института (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».

E-mail: art.pisny2020@gmail.com

Федосеева Елена Валерьевна – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры радиотехники Муромского института (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».

E-mail: elenafedoseeva@yandex.ru

Адрес: 602264, г. Муром, ул. Орловская, 23.