

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ВСТРОЕННОЙ СИСТЕМЫ ВНЕШНЕЙ КАЛИБРОВКИ  
МНОГОДИАПАЗОННОГО СВЧ РАДИОМЕТРИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА  
ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ**

**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».

E-mail: [elenafedoseeva@yandex.ru](mailto:elenafedoseeva@yandex.ru)

**Писный Артём Сергеевич**

магистрант кафедры радиотехники Муромского института (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский Государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых».

**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».

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

*Аннотация:* В статье рассмотрена встроенная система внешней калибровки СВЧ радиометрического комплекса дистанционного зондирования атмосферы, с помощью которого выполняется приём радиощумового излучения в трёх частотных диапазонах на общее зеркало антенны с последовательным разделением по частоте и поляризации сигналов в облучателе. Определены составляющие антенной температуры при введении в состав СВЧ радиометрической системы встроенного внешнего источника шумового сигнала и обоснована необходимость моделирования характеристик системы калибровки. Приведены результаты моделирования системы внешней калибровки — рупорной антенны и облучателя трёхдиапазонного СВЧ радиометрического комплекса, полученные в программе CST Studio.

*Ключевые слова:* трёхдиапазонный СВЧ радиометрический комплекс, внешняя калибровка по генератору шума, антенна системы калибровки, поляризация, моделирование.

### **Введение**

СВЧ радиометрические системы обеспечивают непрерывное зондирование окружающего пространства путём измерения его радиощумового излучения. Информация, полученная СВЧ радиометрическими системами, применяется в метеорологии, авиационном диспетчерском управлении, экологическом мониторинге и сельском хозяйстве [1–5]. Такие системы способны отслеживать изменения состояния атмосферы и результаты их измерений используются при прогнозировании метеорологических явлений.

Оценка метеорологических параметров по данным микроволновых радиометрических измерений основана на применении полуэмпирических моделей, которые задают регрессионные связи между радиояркостью температурой и целевыми метеорологическими вели-

чинами [6]. Поэтому важным вопросом построения систем микроволновой радиометрии для мониторинга атмосферы является калибровка радиометрической аппаратуры, обеспечивающая установление однозначного соответствия между выходным сигналом системы и радиояркостью температурой наблюдаемой области [7–9].

Различают внутреннюю и внешнюю калибровку системы [10–12]. Для внутренней калибровки используют калиброванный источник шумового сигнала, периодически подключаемый на вход приёмника. Но при такой калибровке не учитывается влияние параметров антенны на результаты измерений радиояркостью температурой. При внешней калибровке источник шумового сигнала расположен вне системы, что обеспечивает полную калибровку системы, включая и её антенну.

Реализация внешней калибровки связана с определенными трудностями. Требования к такой калибровке, следующие: расположение источника калиброванного ради шумового излучения в дальней зоне антенны при условии обеспечения углового размера, равного угловому размеру главного лепестка диаграммы направленности антенны при стабильном уровне шумового излучения [13]. В данной работе рассматривается вариант применения для калибровки внешнего источника – генератора шума, расположенного в пределах основной антенны системы, сигнал от которого через рупорную антенну излучается в направлении облучателя зеркала.

Задача, решаемая в данной работе, состоит в оценке параметров системы калибровки СВЧ радиометрического комплекса для трёх частотных каналов с целью получения значений коэффициентов передачи сигнала калибровки путём моделирования в программе CST Studio Suite 2024.

### Метод калибровки СВЧ радиометрического комплекса по встроенному внешнему источнику шумового сигнала

Задача калибровки СВЧ радиометрической системы состоит в определении соответствия значений выходного сигнала измеряемой величине радиояркостной температуры при условии их линейной зависимости. При формировании на входе системы двух калиброванных величин шумового сигнала, которым соответствуют два различных прироста антенной температуры, позволяет оценить параметры линейной зависимости выходного сигнала системы — крутизны характеристики  $S$  и начала отсчёта  $U_0$  [10–12]

$$u_a = ST_a + U_0, \quad (1)$$

где  $u_a$  — амплитуда напряжения сигнала на выходе радиометра.

Антенная температура СВЧ радиометрической системы связана с измеряемой радиояркостной температурой выражением

$$T_a = (\bar{T}_{ярк} (1 - \beta)\eta + \bar{T}_\phi \beta \eta + T_0 (1 - \eta))k_{обл}, \quad (2)$$

где  $\bar{T}_{ярк}$  и  $\bar{T}_\phi$  — усреднённые значения радиояркостной температуры по области пространства, соответствующих угловой области главного лепестка и области рассеяния диаграммы направленности (ДН) антенны;  $\beta$  — коэффициент рассеяния антенны;  $\eta$  — КПД антенны;  $T_0$  — термодинамическая температура антенны;  $k_{обл}$  — коэффициент передачи облучателя антенны в заданном диапазоне частот.

Введение в состав СВЧ радиометрической системы встроенного внешнего источника шумового сигнала приведёт к появлению в составе антенной температуры дополнительной компоненты, величина которой пропорциональна шумовой температуре данного источника.

$$\Delta T_a = T_{ш} \gamma_{ш} k_{обл}, \quad (3)$$

где  $T_{ш}$  — радиояркостная температура источника шумового сигнала;  $\gamma_{ш}$  — коэффициент, учитывающий уменьшение шумовой мощности на входе облучателя за счёт пространственной расходимости излучения, формируемого источником шумового сигнала.

Для оценки калибровочной характеристики СВЧ радиометрической системы относительно измеряемой радиояркостной температуры при введении встроенного генератора шума необходимо получить три выходных сигнала:

- выходной сигнал, соответствующий приёму радиотеплового излучения с направления в зенит при условии возможности достаточно точной оценки радиояркостной температуры атмосферы;
- два разностных выходных сигнала, равных разности выходных сигналов при наличии и отсутствии источников шумового сигнала при приёме радиотеплового излучения атмосферы по направлению в зенит.

Согласно выражению (3) прирост антенной температуры при введении встроенного источника шумового сигнала для калибровки системы определяется коэффициентами передачи



**Рис. 1.** Антенна с блоком радиометров трёхдиапазонного СВЧ радиометрического комплекса зондирования атмосферы

$k_{обл}$  и  $\gamma_{ш}$ , величины которых зависят от частоты, конструкции антенны и облучателя.

### СВЧ радиометрический комплекс со встроенной системой внешней калибровки

Система внешней калибровки вводится в состав СВЧ радиометрического комплекса дистанционного зондирования атмосферы, осуществляющего приём радиотеплового излучения в трёх частотных диапазонах с центральными частотами 4 ГГц, 9,375 ГГц и 22 ГГц на общее зеркало антенны с последовательным разделением сигналов по поляризации и частоте в облучателе антенны с многомодовым режимом формирования выходных сигналов [14–16]. Источник калиброванного шумового сигнала соединён с рупором, установленным в

**Таблица 1.** Характеристики антенны СВЧ радиометрического комплекса

ХАРАКТЕРИСТИКА	ЗНАЧЕНИЕ
Диаметр зеркала, мм	2500
Фокусное расстояние $F$ , мм	751
Ширина диаграммы направленности $\Omega_{0.5}$ , град	0.75
Коэффициент усиления, дБ	48

**Таблица 2.** Основные технические характеристики генератора ГШМ2-20В-13

ХАРАКТЕРИСТИКА	ЗНАЧЕНИЕ
Частотный диапазон, ГГц	0,01...20
Диапазон ИОШТ, дБ	13...16
КСВН выхода, не более	1,45

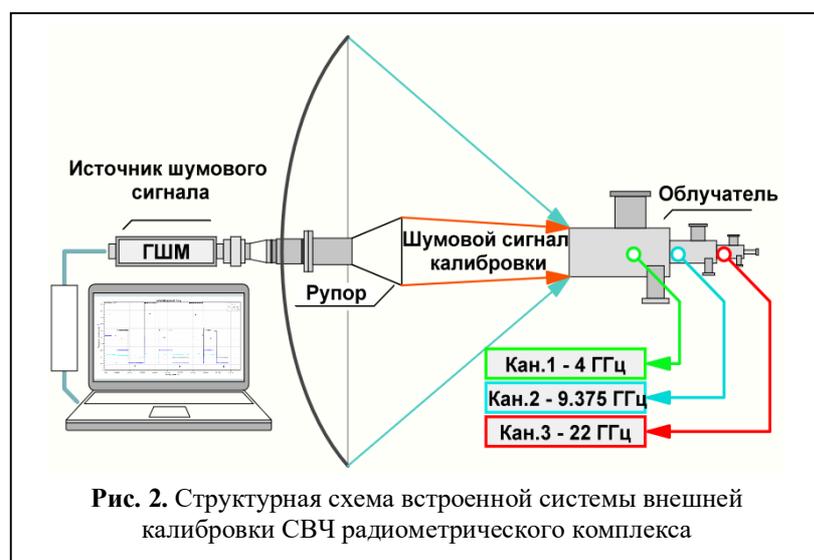
основании зеркала (рис. 1).

Антенна СВЧ радиометрического комплекса зеркальная с общей апертурой при приёме радиозумового сигнала в трёх частотных диапазонах. Её параметры приведены в таблице 1. В качестве источника шумового сигнала используется модуль СВЧ генератора шума ГШМ2-20В-13, основные характеристики которого представлены в таблице 2.

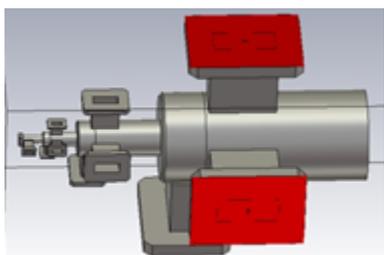
Функциональная схема встроенной системы внешней калибровки трёхдиапазонного СВЧ радиометрического комплекса дистанционного зондирования атмосферы приведена на рис. 2.

### Моделирование встроенной системы внешней калибровки СВЧ радиометрического комплекса

Основная задача моделирования встроенной системы внешней калибровки системы внешней калибровки состояла в оценке коэффициентов передачи шумового сигнала от генератора шума на выходы облучателя трёхдиапазонной СВЧ радиометрической системы при последовательном разделении по частоте и поляризации с расположением рупора системы калибровки в основании зеркала (рис. 2). Передача сигнала генератора шума от рупорной антенны до раскрытия облучателя выполняется с рассеянием сигнала в окружающее простран-



**Рис. 2.** Структурная схема встроенной системы внешней калибровки СВЧ радиометрического комплекса



**Рис. 3.** Модель облучателя зеркальной антенны трёхдиапазонной СВЧ радиометрического комплекса

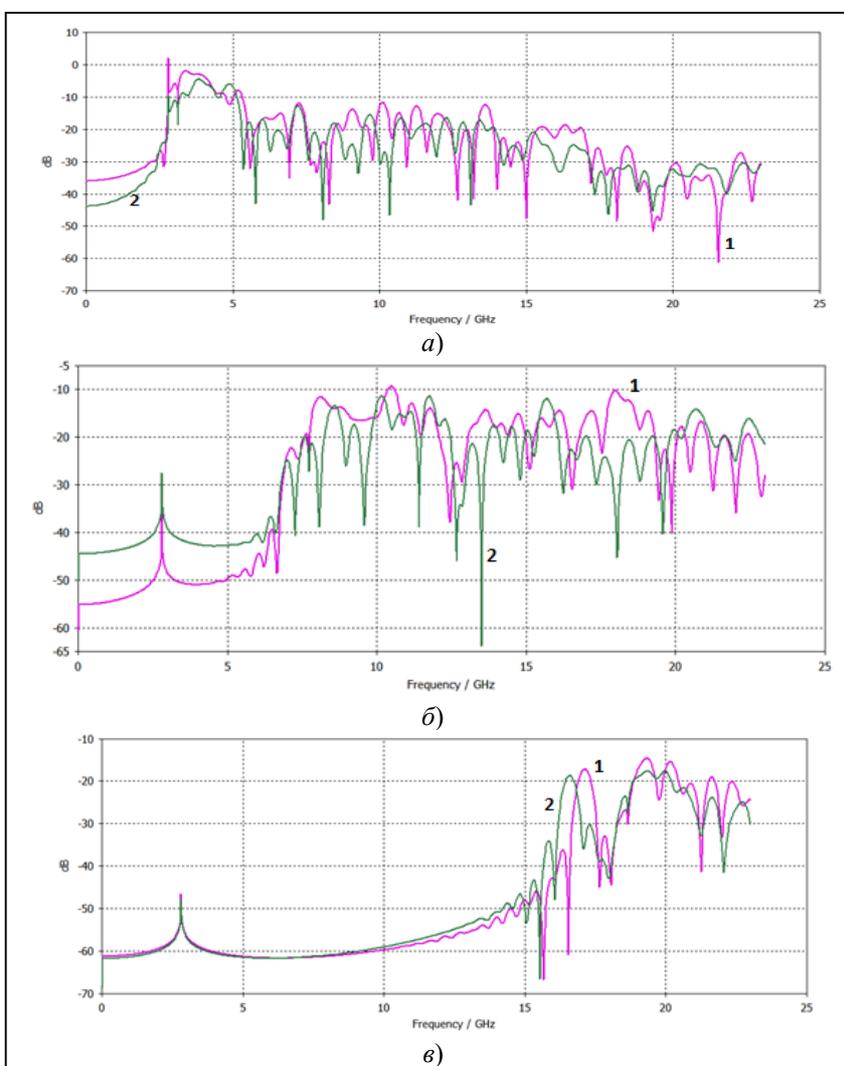
ство, что приводит к уменьшению коэффициента передачи в системе калибровки. Разница в ширине диаграммы направленности рупорной антенны на разных частотах определяет различие в величине сигнала на входе облучателя в трёх частотных диапазонах СВЧ радиометрической системы.

Следующим фактором, влияющим на величину коэффициента передачи системы калибровки, является различие условий прохождения сигналов разных частотных диапазонов в облучателе антенны с разделением по частоте и поляризации в трёх последовательно расположенных конструктивных модулях.

Необходимость в раздельной оценке влияния указанных факторов на коэффициент передачи встроенной системы внешней калибровки определила задачу выполнения двухэтапного моделирования. Первый этап — оценка коэффициентов передачи сигнала калибровки, поданного непосредственно на вход облучателя

для каждого его модуля, второй этап — получение коэффициентов передачи сигнала калибровки при его излучении из рупора в направлении облучателя.

Для оценки коэффициентов передачи сигнала калибровки, подаваемого непосредственно на вход облучателя, была составлена модель в программе CST Studio Suite по размерам реального облучателя антенны СВЧ радиометрического комплекса, состоящего из трёх модулей (рис. 3), в каждом из которых предусмотрены два волноводных выхода для формирования выходных сигналов на вертикальной и горизонтальной поляризации.



**Рис. 4.** Частотные зависимости коэффициентов передачи трёх модулей облучателя трёхдиапазонной СВЧ радиометрической системы с центральными частотами 4 ГГц (а), 9,375 ГГц (б) и 22 ГГц (в) на основной поляризации (1) и кросс поляризации (2)

При подаче на вход облучателя широкополосного сигнала были получены частотные зависимости коэффициентов передачи для каждого модуля. Они приведены на рис. 4.

Полученные частотные зависимости коэффициентов передачи показали существенное различие в их величине для трёх модулей облучателя. Для первого модуля, работающего в диапазоне с центральной частотой 4 ГГц, коэффициент передачи для каждой поляризации  $-3,5$  дБ, что говорит о малых потерях сигнала при делении мощности между двумя выходами. Для модулей с центральными частотами 9,375 ГГц и 22 ГГц коэффициенты передачи

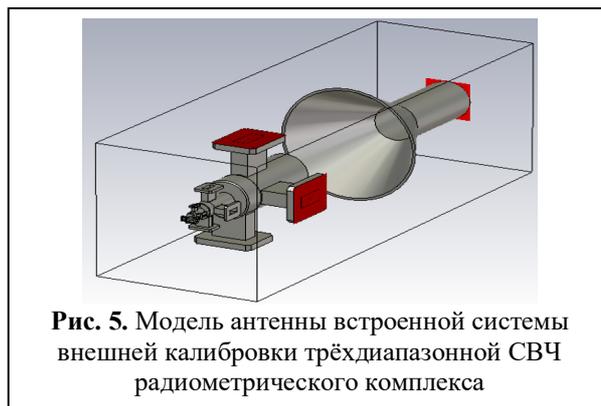


Рис. 5. Модель антенны встроенной системы внешней калибровки трёхдиапазонной СВЧ радиометрического комплекса

имеют величину  $-12$  дБ и  $-17$  дБ соответственно, что обусловлено потерями сигнала в более низкочастотных модулях и рассогласованием в сложной конструкции

последовательного выделения сигналов. Это должно быть учтено введением усилителей с соответствующими коэффициентами усиления в радиометрах в трёх рабочих диапазонах.

Для анализа условий прохождения сигнала от генератора шума — источника калиброванного сигнала, излучаемого с помощью рупора в направлении облучателя антенны СВЧ радиометрического комплекса, была составлена модель в программе CST Studio Suite (рис. 5), в которой рупор располагался на расстоянии от облучателя, равном фокусному расстоянию зеркала 751 мм, т.е. в основании зеркала антенны. Рупор антенны встроенной системы внешней калибровки — конический с радиусом раскрытия 105 мм.

Были получены частотные зависимости коэффициентов передачи сигнала калибровки, подаваемого на

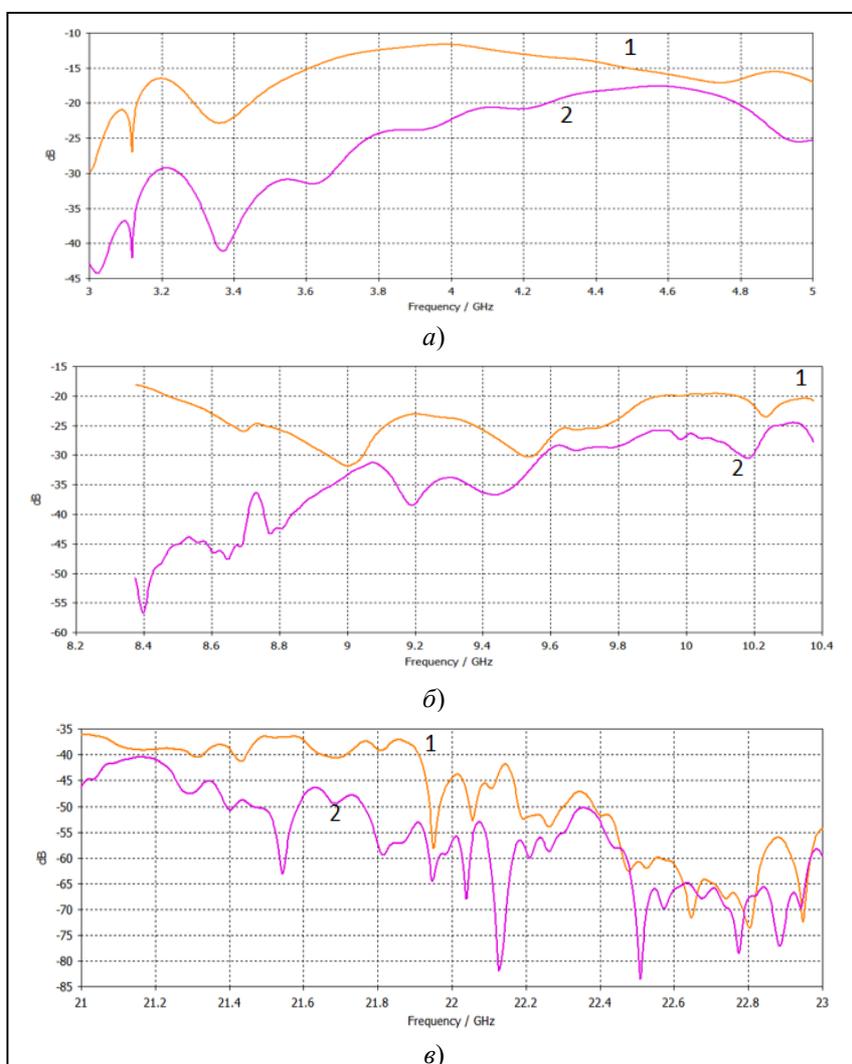


Рис. 6. Коэффициент передачи антенны встроенной системы внешней калибровки трёхдиапазонной СВЧ радиометрической системы с центральными частотами 4 ГГц (а), 9,375 ГГц (б) и 22 ГГц (в) на основной поляризации (1) и кросс поляризации (2)

вход рупора и излучаемого в направлении облучателя для каждого его модуля. Они приведены на рис. 6.

Анализ полученных частотных зависимостей коэффициентов передачи сигнала в антенне встроенной системы внешней калибровки позволил сделать следующие выводы:

- явление рассеяния мощности при излучении сигнала калибровки от рупора в направлении облучателя приводит к уменьшению величины коэффициента передачи, причём на разную величину для трёх частотных диапазонов: на частоте 4 ГГц на основной поляризации его величина составила  $-12$  дБ, на частоте 9,375 ГГц она равна  $-24$  дБ, а на частоте 22 ГГц  $-44$  дБ;

- отличаются коэффициенты передачи сигнала калибровки и по неравномерности их величины в пределах рабочей полосы частот каждого канала (ширина полосы частот каналов 1 ГГц): на частоте 4 ГГц на основной поляризации неравномерность АЧХ равна  $-5$  дБ, на частоте 9,375 ГГц она равна  $-8$  дБ, а на частоте 22 ГГц  $-18$  дБ;

- разница в величине коэффициента передачи на основной поляризации и кросс поляризации в пределах рабочей полосы частот для всех трёх диапазонов составляет в среднем от 5 до 10 дБ.

### Заключение

Наличие в составе СВЧ радиометрического комплекса встроенного источника калиброванного сигнала позволяет решить задачу внешней калибровки системы даже в условиях изменяющего внешнего фонового излучения, например, при выполнении углового сканирования исследуемого пространства. При реализации такой встроенной системы калибровки для решения задачи исключения влияния характеристик облучателя антенны с последовательным разделением по частоте и поляризации выходных сигналов трёх частотных диапазонов СВЧ радиометрической системы необходимо учесть условия передачи сигнала калибровки от генератора шума до радиометров

каждого частотного диапазона.

Результаты моделирования коэффициентов передачи системы внешней калибровки трёхдиапазонного СВЧ радиометрического комплекса зондирования атмосферы показали наличие определённых потерь сигнала калибровки при излучении его через рупор, расположенный в основании зеркала, в направлении облучателя. Эти потери обусловлены рассеянием сигнала калибровки в окружающее пространство на выходе рупора и конечной величиной развязки по частоте модулей и рассогласованием в облучателе при последовательном разделении по частотным диапазонам.

Таким образом для введения встроенной системы внешней калибровки в трёхдиапазонном СВЧ радиометрическом комплексе необходимы дополнительные конструктивные и электродинамические решения для снижения потерь сигнала калибровки.

### Литература

1. Баранов Е.И. Современные технологии радиолокации в авиации и морском транспорте. Новосибирск: Сибирское издательство, 2018. 200 с.
2. Петров М.Л. Применение радиотеплокационных систем в сельском хозяйстве // Вестник аграрной науки. 2019. №4. С. 45–52.
3. Шарков Е.А. Радиотепловое дистанционное зондирование Земли: физические основы: в 2 т. Т. 1. М.: ИКИ РАН, 2014. 544 с.
4. Ware R.A. A multichannel radiometric profiler of temperature, humidity, and cloud liquid // Radio Science. 2003. Vol. 38. No. 4. P. 8079.
5. Kerr Y.H., et al. The SMOS Mission: New Tool for Monitoring Key Elements of the Global Water Cycle. Proceedings of the IEEE. 2010.
6. Степаненко В.Д., Шужин Г.Г., Бобылев Л.П., Матросов С.Ю. Радиотеплокация в метеорологии. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 283 с.
7. Ulaby F.T., Moore R.K., Fung A.K. Microwave Remote Sensing: Active and Passive, Vol. 1. Artech House, 1981.
8. Фалин В.В. Радиометрические системы СВЧ. М.: Луч, 1997. 440 с.
9. Кадыгров Е.Н. Микроволновая радиометрия термической стратификации атмосферы: монография. М.: ФГБУ «ЦАО», 2020. 271 с.
10. Арсаев И.Е., Латишин А.И., Саргсян М.В., Юрчук Э.Ф. Широкоапертурные низкотемпературные генераторы шума для калибровки радиотелескопов двухэлементного радиоинтерферометра со

сверхдлинной базой // Измерительная техника. 2018. №3. С. 55–60.

11. *Kaisti M., Altti M., Poutanen T.* Uncertainty of Radiometer Calibration Loads and Its Impact on Radiometric Measurements // *IEEE Trans. on Mic. Theory and Tech.* 2014. Vol. 62. No. 10. Pp. 2436–2446.

12. *Fedosееva E.V., Rostokin I.N., Shchukin G.G.* Calibration of a Three-Band Microwave System with Background Noise Compensation // *Measurement Techniques.* 2020. Vol. 63. No. 4. Pp. 301–307.

13. *Бутакова С.В.* Широкоапертурный шумовой СВЧ излучатель типа «черное тело» с яркостной температурой 104 К // *Известия вузов. Радиофизика.* 1984. Т. 27. № 11. С. 1431–1435.

14. *Федосеева Е.В., Ростокин И.Н., Щукин Г.Г.*

Многочастотные исследования неоднородной атмосферы // *Метеорология и гидрология.* 2022. №12. С. 78–87.

15. *Ростокин И.Н., Федосеева Е.В.* Вопросы построения многочастотной СВЧ радиометрической системы дистанционного зондирования облачной атмосферы с компенсацией фонового излучения // *Радиотехнические и телекоммуникационные системы.* 2015. № 1(17). С. 5–12.

16. *Федосеева Е.В., Щукин Г.Г., Ростокин И.Н., Ростоккина Е.А.* Компенсация помех в работе СВЧ радиометрических систем // *Радиотехнические и телекоммуникационные системы.* 2014. № 1(13). С. 50–62.

Поступила 5 мая 2025 г.

English

## MODELING OF AN INTEGRATED EXTERNAL CALIBRATION SYSTEM FOR A MULTI-BAND MICROWAVE RADIOMETRIC COMPLEX FOR REMOTE SENSING OF THE ATMOSPHERE

**Elena Valeryevna Fedoseeva** — Grand Dr. in Engineering, Professor, Radioengineering Department, Murom Institute (branch) of the “Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs”.

*E-mail:* [elenafedoseeva@yandex.ru](mailto:elenafedoseeva@yandex.ru)

**Artem Sergeevich Pisnyi** — Master’s Degree Student, Radioengineering Department, Murom Institute (Branch) Murom Institute (branch) of the “Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs”.

**Ilya Nikolaevich Rostokin** — Grand Dr. in Engineering, Professor, Department of Monitoring and Control in Engineering Systems, Murom Institute (branch) of the “Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs”.

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

*Abstract:* The article considers the built-in system of external calibration of the microwave radiometric complex of remote sensing of the atmosphere, with the help of which the reception of radio noise radiation in three frequency bands is performed on a common antenna mirror with sequential frequency and polarization separation of signals in the radiator. The components of the antenna temperature are determined when an integrated external noise signal source is introduced into the microwave radiometric system, and the necessity of modeling the calibration system characteristics is substantiated. The results of modeling the external calibration system, including a horn antenna and a three-band microwave radiometer, using the CST Studio software, are presented.

*Keywords:* three-band microwave radiometric complex, external calibration using a noise generator, calibration system antenna.

### References

1. *Baranov E.I.* Modern radar technologies in aviation and maritime transport. Novosibirsk: Sibirskoe izdatelstvo, 2018. 200 p.
2. *Petrov M.L.* Application of radiothermal radar systems in agriculture. *Vestnik agrarnoi nauki.* 2019. No. 4. Pp. 45–52.
3. *Sharkov E.A.* Radiothermal remote sensing of the earth: physical foundations. In 2 vols. Vol. 1. Moscow: IKI RAN, 2014. 544 p.
4. *Ware R.A.* A multichannel radiometric profiler of temperature, humidity, and cloud liquid. *Radio Science.* 2003. Vol. 38. No. 4. P. 8079.

5. *Kerr Y.H., et al.* The SMOS mission: new tool for monitoring key elements of the global water cycle. Proceedings of the IEEE. 2010.
6. *Stepanenko V.D., Shchukin G.G., Bobylev L.P., Matrosov S.Yu.* Radiothermal radar in meteorology. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1987. 283 p.
7. *Ulaby F.T., Moore R.K., Fung A.K.* Microwave remote sensing: active and passive. Vol. 1. Artech House, 1981.
8. *Falin V.V.* Microwave radiometric systems. Moscow: Luch, 1997. 440 p.
9. *Kadygrov E.N.* Microwave radiometry of thermal atmospheric stratification: A Monograph. Moscow: FGBU "TsAO", 2020. 271 p.
10. *Arsaev I.E., Lapshin A.I., Sargsyan M.V., Yurchuk E.F.* Wide-aperture low-noise generators for calibration of very long baseline interferometry radio telescopes. Izmeritelnaya tekhnika. 2018. No. 3. Pp. 55–60.
11. *Kaisti M., Altti M., Poutanen T.* Uncertainty of radiometer calibration loads and its impact on radiometric measurements. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2014. Vol. 62. No. 10. Pp. 2436–2446.
12. *Fedoseeva E.V., Rostokin I.N., Shchukin G.G.* Calibration of a three-band microwave system with background noise compensation. Measurement Techniques. 2020. Vol. 63. No. 4. Pp. 301–307.
13. *Butakova S.V.* Wide-Aperture microwave noise emitter of the "black body" type with a brightness temperature of 104 K. Izvestiya vuzov. Radiofizika. 1984. Vol. 27. No. 11. Pp. 1431–1435.
14. *Fedoseeva E.V., Rostokin I.N., Shchukin G.G.* Multifrequency studies of the inhomogeneous atmosphere. Meteorologiya i gidrologiya. 2022. No. 12. Pp. 78–87.
15. *Rostokin I.N., Fedoseeva E.V.* Design Issues of a multifrequency microwave radiometric system for remote sensing of cloudy atmosphere with background radiation compensation. Radio engineering and telecommunication systems. 2015. No. 1(17). Pp. 5–12.
16. *Fedoseeva E.V., Shchukin G.G., Rostokin I.N., Rostokina E.A.* Interference compensation in microwave radiometric systems. Radio engineering and telecommunication systems. 2014. No. 1(13). Pp. 50–62.