

## ОЦЕНКА УСЛОВИЙ РЕАЛИЗАЦИИ ВНЕШНЕГО ИСТОЧНИКА СИГНАЛА КАЛИБРОВКИ ДЛЯ МНОГОДИАПАЗОННОЙ СВЧ РАДИОМЕТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

**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»<sup>1</sup>.

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

**Ростокин Илья Николаевич**

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Управление и контроль в технических системах» Муромского института (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский Государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых»<sup>1</sup>.

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

**Щукин Георгий Георгиевич**

доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры технологий и средств геофизического обеспечения ФГБОУ ВО «Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского» Министерства обороны РФ (ВКА им. А.Ф. Можайского)<sup>2</sup>.

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

**Ростоккина Елена Анатольевна**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление и контроль в технических системах» Муромского института (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых»<sup>1</sup>.

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

<sup>1</sup>Адрес: 602264, Российская Федерация, Владимирская обл., г. Муром, ул. Орловская, д. 23.

<sup>2</sup>Адрес: 197082, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д. 13.

**Аннотация:** Проанализированы теоретические основы способа проведения калибровки СВЧ радиометрической системы по шумовому сигналу внешнего генератора шума, определены параметры, задающие величину прироста антенной температуры при введении в состав системы такого внешнего источника сигнала калибровки. Рассмотрены вопросы технической реализации внешнего источника сигнала калибровки для СВЧ радиометрической системы, представлена структурная схема, определено место его расположения в составе антенны. Показана необходимость применения рупорной антенны для создания направленного излучения в сторону облучателя зеркальной антенны. Приведены данные по выполнению такого источника сигнала калибровки для случая его использования в трёхдиапазонной СВЧ радиометрической системе с приёмом шумового сигнала на общую апертуру антенны и последовательным выделением входных сигналов трёх диапазонов в фидерном тракте общего облучателя зеркала. Проанализировано влияние конструктивного исполнения и, соответственно, направленных свойств рупорной антенны источника сигнала калибровки СВЧ радиометрической системы на коэффициент, характеризующий расходимость излучения, создаваемого рупором генератора шума, а также частотные свойства данного коэффициента. Приведены результаты измерений радиотеплового излучения трёхдиапазонной СВЧ радиометрической системой при введении в режим измерений двух периодов калибровки с приёмом радиошумового сигнала от внешнего источника сигнала калибровки, расположенного в основании зеркала антенны.

**Ключевые слова:** СВЧ радиометрическая система, калибровка, генератор шума, рупорная антенна.

### Введение

Важным вопросом дистанционного зондирования окружающей среды СВЧ радиометриче-

скими системами является выбор и реализация способа их калибровки. Данная процедура позволяет установить однозначное соответствие

между уровнем выходного сигнала и величиной радиояркой температуры исследуемой области пространства [1–3].

Полная калибровка системы предполагает наличие в области зондирования калиброванного источника шумового сигнала, что трудно реализуемо при наземном базировании СВЧ радиометрической системы [4–7], 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.

Один из известных вариантов калибровки СВЧ радиометрических систем предполагает использование высокостабильных генераторов шума, создающих относительно равномерное по мощности излучение шумового сигнала [8]. Данный способ создания опорного сигнала лежит в основе калибровки многодиапазонной СВЧ радиометрической системы путём введения в состав внешнего генератора шума, создающего шумовой сигнал на входе облучателя многодиапазонной СВЧ радиометрической системы [9–11]. В данной статье анализируются технические особенности его реализации.

### Теоретические основы калибровки СВЧ радиометрической системы по внешнему генератору шума

Входной сигнал радиометра СВЧ радиометрической системы принято выражать через величину антенной температуры, пропорциональную мощности принимаемого шумового сигнала. Антенная температура СВЧ радиометрической системы, сглаженная характеристика радиошумового излучения окружающего антенну пространства, задаётся выражением:

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

где  $\bar{T}_{ярк}$  и  $\bar{T}_\phi$  — усреднённые значения радиояркой температуры по области пространства, соответствующих угловой области глав-

ного лепестка и области рассеяния диаграммы направленности (ДН) антенны;  $\beta$  — коэффициент рассеяния антенны;  $\eta$  — КПД антенны;  $T_0$  — термодинамическая температура антенны;  $k_{обл}$  — коэффициент передачи фидерного тракта облучателя антенны в заданном диапазоне частот.

В выражении (1) первое слагаемое определяет составляющую антенной температуры, обусловленную приёмом радиошумового излучения из угловой области главного лепестка ДН антенны, характеризующую радиояркую температуру исследуемой области пространства. Для определения численной величины измеряемой радиояркой температуры по величине выходного сигнала радиометра необходимо выполнение процедуры калибровки системы, что возможно при выполнении измерений радиошумового излучения опорного источника с известной радиояркой температурой.

Один из способов формирования опорного радиошумового сигнала для СВЧ радиометрической системы — использование генератора шума, расположенного вне радиометра, создающего определённый уровень шумового сигнала на входе радиометра. Для возможности выполнения внешней калибровки с учётом влияния антенны, рассматривается вариант использования генератора шума, располагаемого в основании зеркала, создающего на входе облучателя антенны опорный радиошумовой сигнал, эквивалентный заданной шумовой температуре. Тогда в составе антенной температуры будет присутствовать дополнительная компонента, величина которой пропорциональна шумовой температуре данного источника:

$$\Delta T_a = T_{ши} \gamma_{ш} k_{обл}, \quad (2)$$

где  $T_{ши}$  — радиояркая температура генератора шума;  $\gamma_{ш}$  — коэффициент, учитывающий уменьшение шумовой мощности на входе облучателя за счёт пространственной расходи-

мости излучения, формируемого генератором шума.

Наличие в составе выражения (2) коэффициента  $\gamma_{ш}$  определяет необходимость оценки влияния конструктивной реализации источника калиброванного радиошумового сигнала на величину прироста антенной температуры на входе радиометра. При выполнении измерений с приёмом на общую апертуру зеркальной антенны в нескольких частотных диапазонах, как это предлагается в [9–14], дополнительно необходимо оценить изменение величины коэффициента  $\gamma_{ш}$  при указанном расположении опорного источника шумового сигнала.

#### Технические вопросы реализации калибровки СВЧ радиометрической системы по внешнему генератору шума

Рассматриваемый вариант калибровки по внешнему генератору шума обеспечивает введение шумового сигнала в тракт облучателя зеркальной антенны СВЧ радиометрической системы с реализацией последовательного выделения входных шумовых сигналов во всех рабочих диапазонах [9–11].

Для обеспечения введения в антенно-фидерный тракт сигнала от генератора шума к его выходу должен быть подсоединён рупор, который устанавливается в отверстии в центре зеркала СВЧ радиометрической системы. Для получения двух калиброванных отсчётов шумовой сигнал от генератора шума проходит через аттенюатор с регулируемым ослаблением 3 дБ. На рис. 1 представлена структурная схема внешнего источника шумового сигнала для калибровки СВЧ радиометрической системы, который содержит генератор шума ГШ, аттенюатор АТ, волноводный переход ВП.

При работе СВЧ радиометрической системы в нескольких частотных диапазонах необходимо обеспечить формирование сигнала калибровки в широкой полосе частот, включающей все рабочие диапазоны частот.

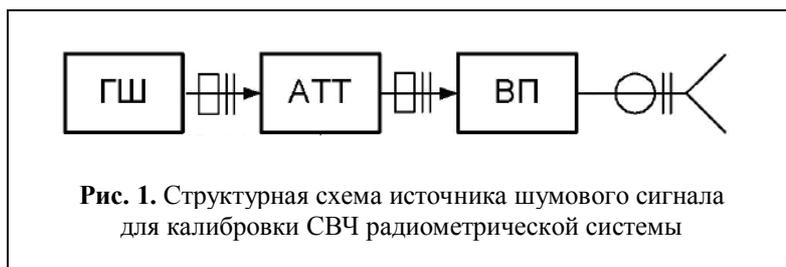


Рис. 1. Структурная схема источника шумового сигнала для калибровки СВЧ радиометрической системы

Техническая реализация данного способа калибровки разрабатывалась для трёхдиапазонной СВЧ радиометрической системы с приёмом на общую апертуру зеркальной антенны диаметром 2400 мм и приёмом на общий облучатель с радиусом раскрытия 72 мм, в котором выполняется последовательное выделение входных сигналов трёх частотных диапазонов.

В качестве источника шумового сигнала использовался модуль СВЧ генератора шума на ЛПД МЗ1305-4 бШ 2.210.121ТУ (ГШ). Для определения температуры шума ГШ учитывалась её связь с уровнем спектральной плотности мощности шума

$$T(f) = 300H(f), \quad (3)$$

где  $H(f)$  — частотная характеристика эквивалентной температуры шума.

На рис. 2 представлены фотографии антенны трёхдиапазонной СВЧ радиометрической системы с внешним широкополосным источником шумового сигнала на основе СВЧ указанного генератора шума.

#### Оценка параметров источника сигнала калибровки СВЧ радиометрической системы на основе генератора шума

Для оценки величины шумовой температуры, создаваемой на входе облучателя СВЧ радиометрической системы, необходимо оценить величину коэффициента  $\gamma_{ш}$ , зависящую от геометрических параметров рупорной антенны, которая присоединена к ГШ и создаёт излучение в направлении облучателя антенны.

Величина коэффициента  $\gamma_{ш}$ , учитывающего расходимость излучения, создаваемого ГШ, оценивалась исходя из направленных свойств рупора широкополосного источника шумового



**Рис. 2.** Антенна трёхдиапазонной СВЧ радиометрической системы с внешним широкополосным источником шумового сигнала: 1 — генератор шума; 2 — аттенуатор; 3 — рупор источника шумового сигнала; 4 — облучатель трёхдиапазонной СВЧ радиометрической системы; 5 — трёхдиапазонный радиометр

сигнала и расстояния от основания зеркала системы до облучателя СВЧ радиометрической системы.

В первом приближении при расположении антенны генератора шума и облучателя в дальней зоне коэффициент  $\gamma_{ш}$  можно оценить по формуле:

$$\gamma_{ш} = (1 - \beta_{ш}) \frac{\theta_{обл}}{\theta_{эл}}, \quad (4)$$

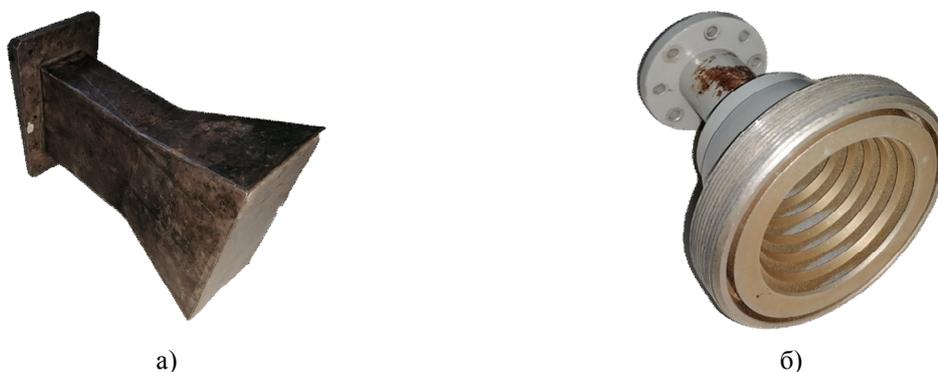
где  $\beta_{ш}$  — коэффициент рассеяния рупора в составе источника шумового сигнала;  $\theta_{эл}$  — ширина главного лепестка ДН антенны генератора шума;  $\theta_{обл}$  — часть угловой области главного лепестка ДН антенны генератора шума, соответствующей раскрытию облучателя

зеркальной антенны СВЧ радиометрической системы.

Величина  $\theta_{обл}$  определялась исходя из геометрических соотношений при условии, что радиус раскрытия облучателя антенны равен 36 мм, а расстояние от раскрытия рупора ГШ до раскрытия облучателя составляет 835 мм. Численное значение  $\theta_{обл}$  равно  $5^\circ$ .

Для многодиапазонной СВЧ радиометрической системы с общей зеркальной антенной и приёмом на общую апертуру облучателя необходима оценка величины коэффициента  $\gamma_{ш}$  в каждом диапазоне частот.

На рис. 3 показаны рупоры, которые были присоединены на выходе генератора шума:



**Рис. 3.** Рупоры для генераторов шума: а) пирамидальный; б) конический гребенчатый

пирамидальный и конический гребенчатый.

В программе SABOR [12] был выполнен расчёт параметров и ДН этих рупоров для рабочих диапазонов частот СВЧ радиометрической системы. Пример результата расчёта для частоты 10 ГГц показан на рис. 4.

В таблице 1 приведены обобщённые данные расчёта параметров рупоров для ГШ СВЧ радиометрической системы (ширина ДН по уровню половинной мощности  $2\theta_{0,5}$ , коэффициент рассеяния мощности за пределы угловой области  $2\theta_{0,5}$ , выраженный в дБ —  $\beta_{\text{зидб}}$ ) для

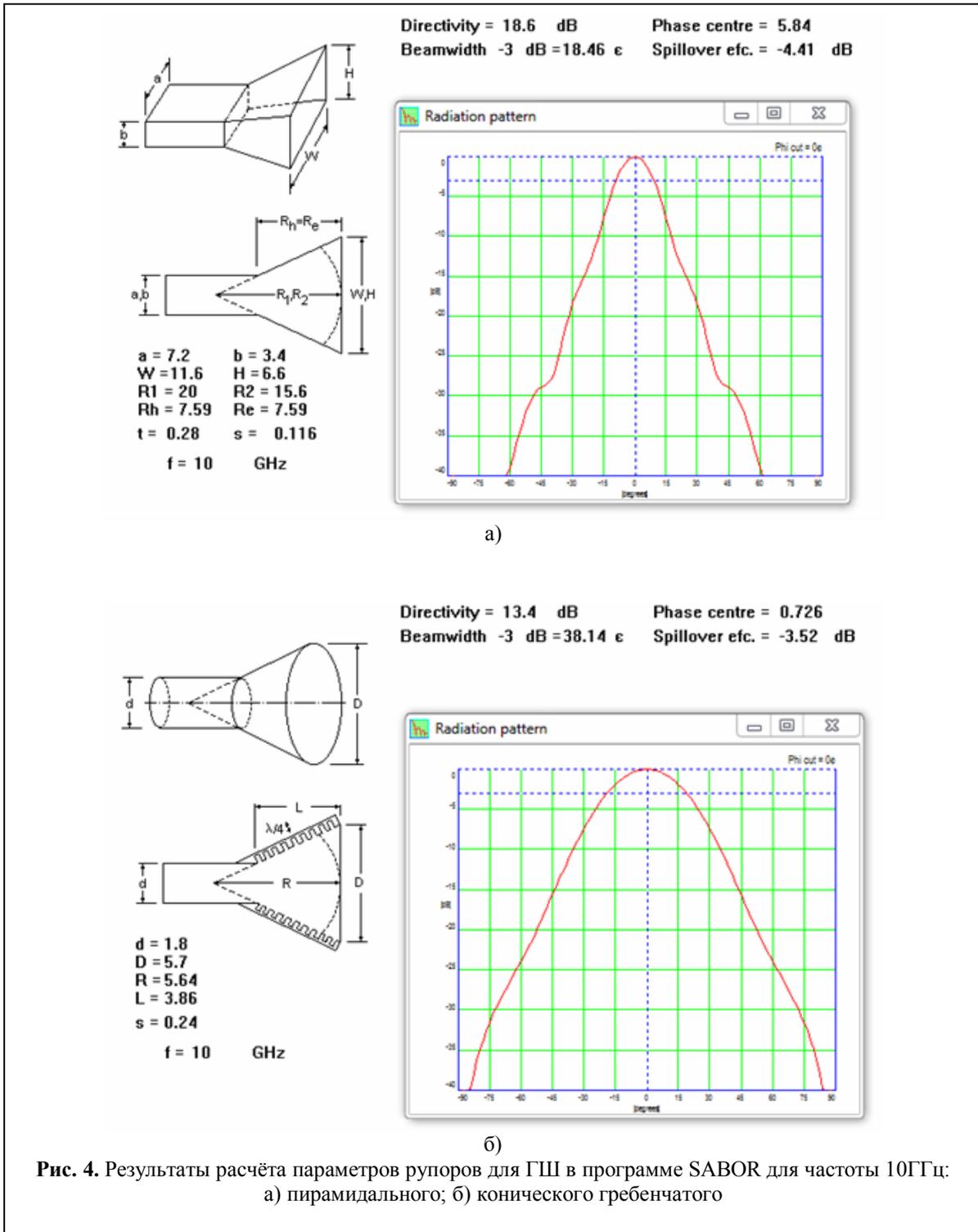


Таблица 1.

Параметры рупоров	Пирамидальный рупор		Конический гребенчатый рупор	
	10 ГГц	22,2 ГГц	10 ГГц	22,2 ГГц
$2\theta_{0,5}, ^\circ$	18,46	13,18	38,14	18,11
$\beta_{шдБ}, дБ$	-4,41	-3,93	-3,52	-3,1
$\gamma_{ш}$	0,173	0,226	0,073	0,141

центральных частот двух рабочих диапазонов (10 ГГц и 22,2 ГГц) и выполнена оценка коэффициента  $\gamma_{ш}$  в соответствии с выражением (4).

Приведённые в таблице 1 данные по параметрам рупоров ГШ показывают, что коэффициент расходимости  $\gamma_{ш}$  характеризуется достаточно сильной частотной зависимостью, причем в коническом рупоре она проявляется сильнее. Так, отношение значений  $\gamma_{ш}$  на частотах 22,2 ГГц и 10 ГГц для пирамидального рупора равно 1,306, а для конического гребенчатого — 1,931, что обязательно должно быть учтено при проведении калибровки многодиапазонных СВЧ радиометрических систем по внешнему ГШ.

**Результаты экспериментальной проверки метода калибровки СВЧ радиометрической системы по внешнему генератору шума**

Для экспериментальной оценки возможности калибровки трёхканальной СВЧ радиометрической системы по внешнему ГШ, установленному в раскрыве зеркальной антенны, были выполнены измерения, включающие три режима: 1 — при включённом ГШ при ослаблении на аттенуаторе 0дБ; 2 — при включённом ГШ при ослаблении на аттенуаторе 3 дБ; 3 — при выключенном ГШ.

На рис. 5 приведены временные записи выходных сигналов СВЧ радиометрической системы при приёме в трёх частотных диапазонах с ГШ М31305-4 бШ 2.210.121ТУ и с пирамидальным рупором.

Различие в уровнях сигнала на трёх диапазонах объясняется частотной зависимостью

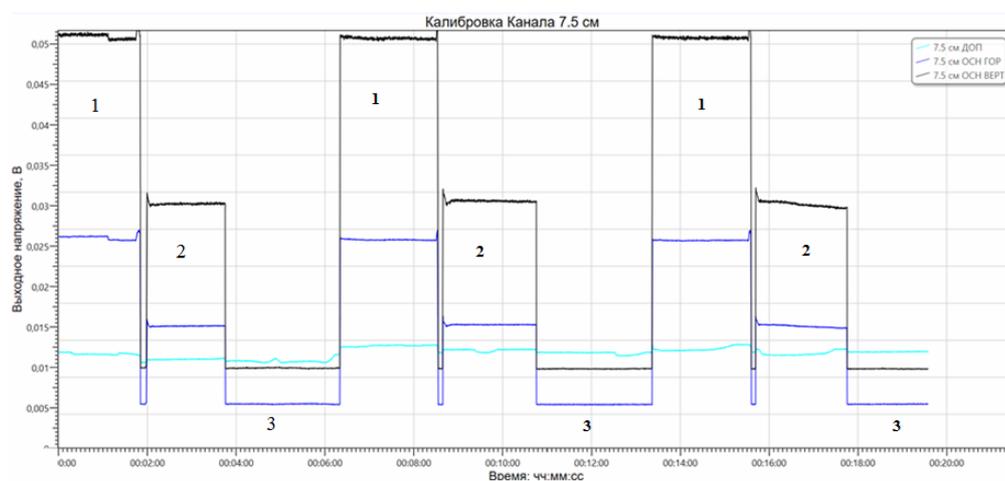
коэффициента расходимости  $\gamma_{ш}$  для общего рупора ГШ для трёх диапазонов и частотной зависимостью шумовой температуры СВЧ модуля М31305-4 бШ 2.210.121ТУ.

**Заключение**

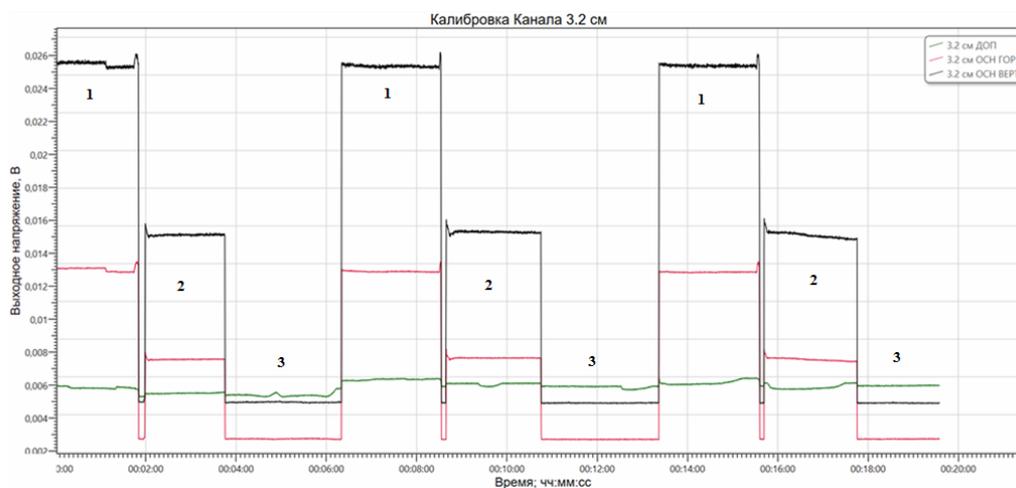
Выполненный анализ особенностей технической реализации способа калибровки многодиапазонной СВЧ радиометрической системы по внешнему ГШ, расположенному в основании зеркала антенны, при приёме радиощумового излучения на общую апертуру антенны и последовательным выделением сигналов рабочих диапазонов частот в облучателе, показал необходимость тщательной проработки вопроса выбора источника шумового сигнала с учётом частотной зависимости параметров как излучающей системы — рупора, так и частотной зависимости шумовой температуры ГШ в полосе частот, содержащей все частотные диапазоны системы.

Выявленные особенности реализации источника шумового сигнала калибровки для многодиапазонной СВЧ радиометрической системы необходимо учесть на этапе разработки и технической настройки. При этом основное преимущество данного способа калибровки с применением внешнего генератора состоит в возможности её выполнения в произвольных условиях наземного базирования СВЧ радиометрической системы.

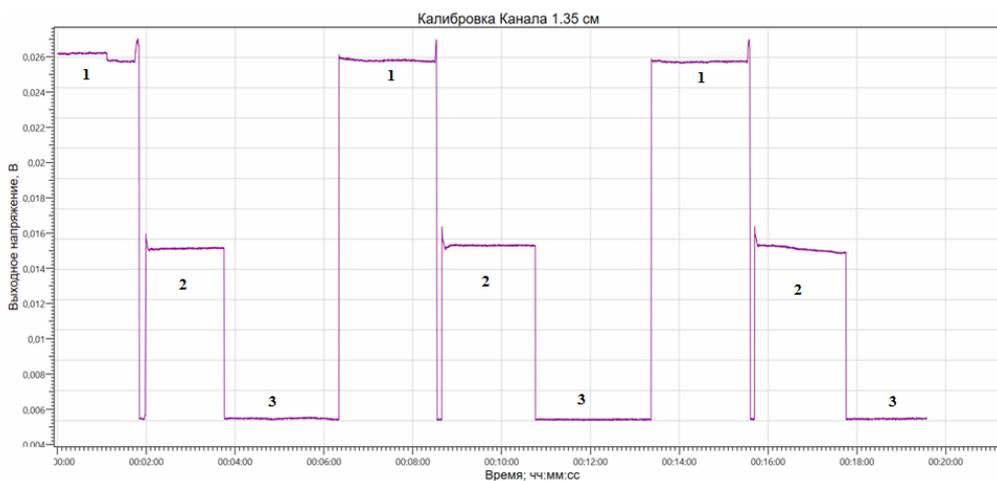
*Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 21-19-00378, <https://rscf.ru/project/21-19-00378/>*



а)



б)



в)

**Рис. 5.** Выходные сигналы трёхдиапазонной СВЧ радиометрической системы при выполнении калибровки по внешнему генератору шума: 1 — при включённом ГШ при ослаблении на аттенюаторе 0 дБ; 2 — при включённом ГШ при ослаблении на аттенюаторе 3дБ; 3 — при выключенном ГШ

### Литература

1. Степаненко В.Д., Щукин Г.Г., Бобылев Л.П., Матросов С.Ю. Радиотеплокация в метеорологии. Л.: Гидрометеоздат, 1987. 283 с.
2. Фалин В.В. Радиометрические системы СВЧ. М.: Луч, 1997. 440 с.
3. Rose T., Crewell S., Löhnert U., Simmer C. A network suitable microwave radiometer for operational monitoring of cloudy atmosphere // Atmospheric Research. 2005. Pp. 183–200.
4. Арсаев И.Е., Лапишин А.И., Саргсян М.В., Юрчук Э.Ф. Широкоапертурные низкотемпературные генераторы шума для калибровки радиотелескопов двухэлементного радиоинтерферометра со сверхдлинной базой // Измерительная техника. №3, 2018. С. 55–60.
5. Martín-Neira M., Suess M., Kainulainen J., Martín-Porqueras F. The Flat Target Transformation. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. March 2008. Vol. 46. No. 3. DOI:10.1109/TGRS.2008.916259
6. Yong Han, Westwater Ed R. Analysis and Improvement of Tipping Calibration for Ground-Based Microwave Radiometers // IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 2000. Vol. 38. No. 3. Pp. 1260–1276. DOI:10.1109/36.843018
7. Kaisti M., Altti M., Poutanen T. Uncertainty of Radiometer Calibration Loads and Its Impact on Radiometric Measurements IEEE Transactions on microwave theory and techniques, Vol. 62, No. 10, October 2014. Pp. 2436–2446
8. Бутакова С.В. Широкоапертурный шумовой СВЧ излучатель типа «черное тело» с яркостной температурой 104 К // Изв. вузов. Радиофизика. 1984. Т. 27. № 11. С. 1431–1435.
9. 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 (4). Pp. 301–307. DOI: 10.1007/s11018-020-01787-z
10. Rostokin I.N., Fedoseeva E.V., Rostokina E.A., Shchukin G.G. Use of solar radiothermal radiation as an external reference source to calibrate a multi-frequency microwave radiometric system with background noise compensation. Journal of Physics: Conference Series 2020 Russian open scientific conference "Modern problems of remote sensing, radar, wave propagation and diffraction" (MPRSRWP) 2020 23-25 June 2020, Murom. DOI:10.1088/1742-6596/1632/1/012025
11. Rostokin I., Fedoseeva E., Rostokina E., Shchukin G. Multifrequency Microwave Radiometric Method of Detection and Control of Dangerous Atmospheric Weather Events, Resistant to Changing Measurement Conditions - 2019 Russian Conference on Radio Wave Propagation (RWP) Kazan, Russian 1-6 July 2019, IEEE Catalog, Pp: 384–387. DOI: 10.1109/RWP.2019.8810166
12. 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.
13. 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.
14. Федосеева Е.В., Щукин Г.Г., Ростокин И.Н., Ростокина Е.А. Компенсация помех в работе СВЧ радиометрических систем // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2014. №1 (13). С. 50–62.

Поступила 30 июня 2021 г.

English

## REQUIREMENTS' EVALUATION TO IMPLEMENT THE EXTERNAL SOURCE OF CALIBRATION SIGNAL FOR MULTI-BAND MICROWAVE RADIOMETRIC SYSTEM

**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"<sup>1</sup>.

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

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

**Georgy Georgyevich Shchukin** — Grand Dr. in Physics and Mathematics, Professor, Department of Technologies and Army Geophysical Support Federal State-owned Military Educational In-

stitution of Higher Education “Military Space Academy named after A.F. Mozhaysky”<sup>2</sup>, Ministry of Defense of the Russian Federation.

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

**Elena Anatoljevna Rostokina** — PhD, Associate 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”.

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

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

*Abstract:* There is analyzed method theoretical basis for performing calibration of microwave radiometric system through noise signal of external noise generator, parameters are defined that predetermine the value of antenna temperature increase when such an external source of calibration signal is integrated into system. To evaluate the impact of source technical features for noise calibration signal based on external noise generator, a coefficient is introduced having regard to noise power reduction at the feed input due to spatial divergence of radiation formed by noise generator. Matters are addressed concerning technical implementation of external source for calibration signal in microwave radiometric system, block diagram is presented and its location in the antenna is defined. Attenuator is incorporated into external source of calibration signal that enables to form two levels of noise signal. The need to use a horn antenna for directed radiation towards reflector feed is indicated. There is data given on implementing such a source of calibration signal in case of its use in three-band microwave radiometric system with noise signal reception to common antenna aperture and subsequent extraction of three-band input signals in the feeder path of common reflector feed. The effect of structural design and thus horn antenna directional response of calibration signal source in microwave radiometric system on the coefficient characterizing radiation divergence formed by noise generator horn, as well as the frequency properties of this coefficient were analyzed. Obtained results revealed a significant difference in frequency properties of the above coefficient of two horn antennas — a pyramidal and conic ridge horn, used as part of calibration signal source and that defines the need to solve the problem of optimal choice of antenna for multi-band microwave radiometric system. Measurements results for radio thermal radiation by three-band microwave radiometric system are given when enabling measurement mode of two calibration periods with reception of radio noise signal from external calibration signal source located at antenna reflector substructure. Measurement data analysis for three frequency channels of microwave radiometric system indicated the need to account for frequency dependence of noise temperature in noise generator in the frequency band containing all frequency ranges of microwave radiometric system. The identified features of source for noise calibration signal in multi-band microwave radiometric system do not overrule the main advantage of this calibration method using external generator, which is the possibility of its implementing in random conditions of ground-based microwave radiometric system.

*Keywords:* microwave radiometric system, calibration, noise generator, horn antenna.

This work has been supported the Russian Science Foundation,  
(Project No. 21-19-00378), <https://rscf.ru/project/21-19-00378/>

### References

1. *Stepanenko V.D., Shchukin G.G., Bobylev L.P., Matrosov S.Yu.* Radioteplotolocation in meteorology. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1987. 283 p.
2. *Falin V.V.* Radiometric microwave systems. Moscow: Luch, 1997. 440 p.
3. *Rose T., Crewell S., Löhnert U., Simmer C.* A network suitable microwave radiometer for operational monitoring of cloudy atmosphere. *Atmospheric Research*. 2005. Pp. 183–200.
4. *Arsaev I. E., Lapshin A. I., Sargsyan M. V., Yurchuk E. F.* Wide-aperture low-temperature noise generators for calibration of radio telescopes of a two-element radio interferometer with an ultra-long base. *Measurement Techniques*. No. 3, 2018. Pp. 55–60.
5. *Martín-Neira M., Suess M., Kainulainen J., Martín-Porqueras F.* The Flat Target Transformation. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* March 2008. Vol. 46. No. 3. DOI:10.1109/TGRS.2008.916259
6. *Yong Han, Westwater Ed R.* Analysis and Improvement of Tipping Calibration for Ground-Based Microwave Radiometers. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 2000. Vol. 38. No. 3. Pp. 1260–1276. DOI:10.1109/36.843018

7. *Kaisti M., Altti M., Poutanen T.* Uncertainty of Radiometer Calibration Loads and Its Impact on Radiometric Measurements IEEE Transactions on microwave theory and techniques, Vol. 62, No. 10, October 2014. Pp. 2436–2446
8. *Butakova S. V.* A wide-aperture noise microwave emitter of the "black body" type with a brightness temperature of 104 K. Izvestia vuzov. Radiophysics. 1984. Vol. 27. No. 11. Pp. 1431–1435.
9. *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 (4). Pp. 301–307. DOI: 10.1007/s11018-020-01787-z
10. *Rostokin I.N., Fedoseeva E.V., Rostokina E.A., Shchukin G.G.* Use of solar radiothermal radiation as an external reference source to calibrate a multi-frequency microwave radiometric system with background noise compensation. Journal of Physics: Conference Series 2020 Russian open scientific conference "Modern problems of remote sensing, radar, wave propagation and diffraction" (MPRSRWP) 2020 23-25 June 2020, Murom. DOI:10.1088/1742-6596/1632/1/012025
11. *Rostokin I., Fedoseeva E., Rostokina E., Shchukin G.* Multifrequency Microwave Radiometric Method of Detection and Control of Dangerous Atmospheric Weather Events, Resistant to Changing Measurement Conditions - 2019 Russian Conference on Radio Wave Propagation (RWP) Kazan, Russian 1-6 July 2019, IEEE Catalog, Pp: 384–387. DOI: 10.1109/RWP.2019.8810166
12. *Rostokin I.N., Fedoseeva E.V.* Questions of constructing a multi-frequency microwave radiometric system for remote sensing of the cloud atmosphere with background radiation compensation. Radiotekhnicheskiye i telekommunikacionnye sistemy. 2015. No. 1(17). Pp. 5–12.
13. *Rostokin I.N., Fedoseeva E.V.* Questions of constructing a multi-frequency microwave radiometric system for remote sensing of the cloud atmosphere with background radiation compensation. Radiotekhnicheskiye i telekommunikacionnye sistemy. 2015. No. 1(17). Pp. 5–12.
14. *Fedoseeva E.V., Shchukin G.G., Rostokin I.N., Rostokina E.A.* Compensation of interference in the operation of microwave radiometric systems. Radiotekhnicheskiye i telekommunikacionnye sistemy. 2014. No. 1 (13). Pp. 50–62.