

## **Исследование вопросов реализации внешней калибровки многочастотной микроволновой радиометрической системы с компенсацией фонового излучения**

И.Н. Ростокин, Е.В.Федосеева, Е.А. Ростокина

*Муромский институт (филиал) ФГБОУ ВО «Владимирского государственного университета им. А.Г. и Н.Г.Столетовых», 602264, г. Муром, Владимирской обл., ул. Орловская 23, E-mail: [elenafedoseeva@yandex.ru](mailto:elenafedoseeva@yandex.ru)*

*Рассмотрены вопросы метрологического обеспечения микроволновых радиометрических исследований облачной атмосферы. Проведено экспериментальное исследование способа внешней калибровки, разработанной многочастотной микроволновой радиометрической системы с зеркальной антенной по радиотепловому излучению безоблачной атмосферы с компенсацией фонового излучения одновременно в трех рабочих диапазонах (7.5 см, 3.2 см, 1.35 см).*

*Considered questions of metrological assurance of microwave radiometric studies of the cloudy atmosphere. Experimental study on method for external calibration of the developed multi-frequency microwave radiometric system with a mirror antenna for a radio thermal radiation in a cloudless atmosphere with compensation of background radiation in three working bands (7.5 cm, 3.2 cm, 1.35 cm).*

### **Введение**

Калибровка микроволновой радиометрической системы позволяет установить однозначное соответствие между измеряемой радиояркостной температурой исследуемой области и выходным сигналом микроволнового радиометрического приемника [1].

Достаточно хорошо изучены способы калибровки приемников СВЧ радиометрических систем [1,2]. В качестве эталонных мер обычно используют тепловые генераторы шума, представляющие собой, охлаждаемые или нагреваемые устройства в виде согласованных нагрузок или полостей с излучающей апертурой, характеристики которых приближаются к характеристикам «черного тела». Выше перечисленные эталонные источники шумового излучения позволяют проводить внутреннюю калибровку микроволнового радиометрического приемника или микроволновых радиометрических систем, имеющих приемные антенны небольших размеров, не превышающих размеры излучающих апертур низкотемпературных широкоапертурных излучателей.

При работе с остронаправленными зеркальными антеннами с высоким коэффициентом усиления с большими излучающими апертурами, должна быть решена задача внешней калибровки микроволновой радиометрической аппаратуры, включая антенную систему. Один из вариантов решения указанной задачи - применение апертурных излучателей, расположенных в дальней зоне диаграммы направленности антенны. Но реализация данного способа сопряжена со значительными трудностями наведения на источник калибровочного сигнала и наличия антенных полигонов значительных размеров.

Один из возможных способов внешней калибровки микроволновой радиометрической измерительной аппаратуры, включая антенную систему, основан на использовании естественных эталонов радиотеплового излучения, в качестве которых традиционно используют астрономические источники (реликтовое космическое излучение, излучение звезд и планет или их спутников) или излучение безоблачной атмосферы. Для обеспечения требования наличия нескольких уровней калибровочного входного сигнала на практике применяют так называемую наклонную (tipping)

калибровку, производя измерения уровня радиотеплового излучения атмосферы при нескольких углах наклона антенны [3].

Один из факторов, определяющих величину ошибки наклонной калибровки, - изменение уровня фонового излучения, принимаемого по области рассеяния диаграммы направленности антенны при изменении угла наклона. В микроволновой радиометрической системе с компенсацией фонового шума решается данная задача путем формирования выходного разностного сигнала [4-6] при двухканальном приеме радиотеплового излучения с получением сигнала компенсации на выходе дополнительного антенного канала, осуществляющего прием по области рассеяния диаграммы направленности основного антенного канала.

В данной работе оцениваются условия проведения наклонной калибровки в микроволновой многочастотной радиометрической системе с компенсацией фонового излучения.

### Угловая зависимость радиотеплового излучения безоблачной атмосферы

В основе метода наклонной калибровки микроволновой радиометрической системы лежит угловая зависимость уровня радиотеплового излучения безоблачной атмосферы.

Радиояркая температура безоблачной атмосферы в общем случае определяется выражением

$$T_{\text{атм}} = \int_0^{\infty} T e^{-\tau} dr, \quad (1)$$

где  $T$  – температура атмосферы в точке, находящейся на расстоянии  $r$  от антенны в направлении наблюдения;

$\tau = \int \chi dr$  – оптическая толщина безоблачной атмосферы;

$\chi$  – коэффициент поглощения безоблачной атмосферы.

В случае однородной (безоблачной) атмосферы угловая зависимость радиояркой температуры в диапазоне углов от  $5^\circ$  до  $90^\circ$  согласно [7] может быть задана следующим образом

$$T_{\text{атм}}^\lambda(h) = T_{\text{зен}}^\lambda / \sin(h), \quad (2)$$

где  $T_{\text{зен}}^\lambda$  – радиояркая температура атмосферы в зените ( $90^\circ$ ) на длине волны  $\lambda$ ;

$h$  – угол возвышения антенны, от  $5^\circ$  до  $90^\circ$ .

Форма угловой зависимости радиояркой температуры стандартной атмосферы по данным, приведенным в работе [7], показана на рис. 1.

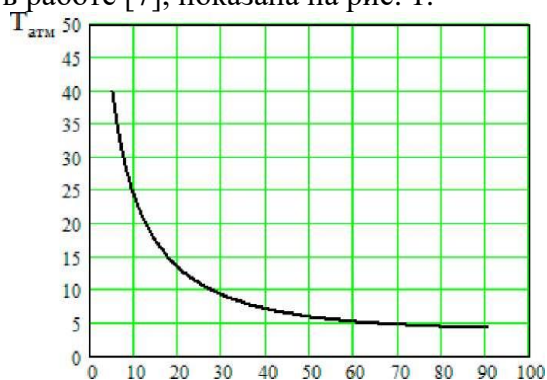


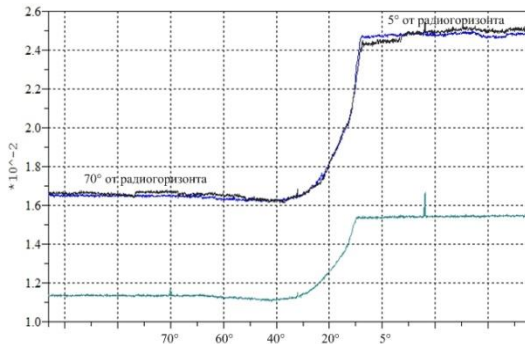
Рис. 1. Угловая зависимость радиояркой температуры стандартной атмосферы

Согласно данным рис. 1 и зависимости (2) основное приращение радиояркой температуры наблюдается при малых углах возвышения от  $0^\circ$  до  $30^\circ$  близких к направлению радиогоризонта, для которых в микроволновых системах с слаборазнесенными антеннами может существенно изменяться вклад в антенную температуру фонового излучения принимаемого через область рассеяния ДН антенны.

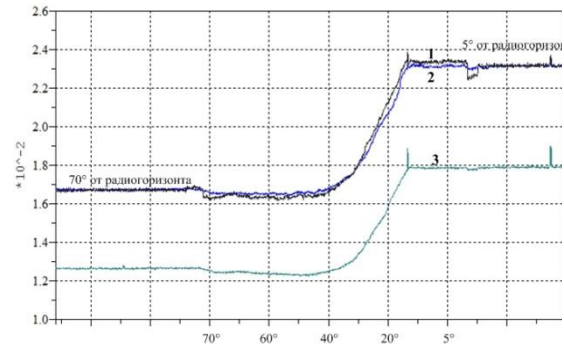
## Экспериментальные исследования угломестных разрезов радиотеплового излучения атмосферы

Для оценки условий проведения наклонной калибровки для микроволновой трехдиапазонной радиометрической системы с компенсацией фонового излучения [6] с приемом на общую апертуру зеркала были выполнены измерения по методу угломестных разрезов безоблачной атмосферы и в условиях сплошной облачности, результаты которых представлены на рис. 2.

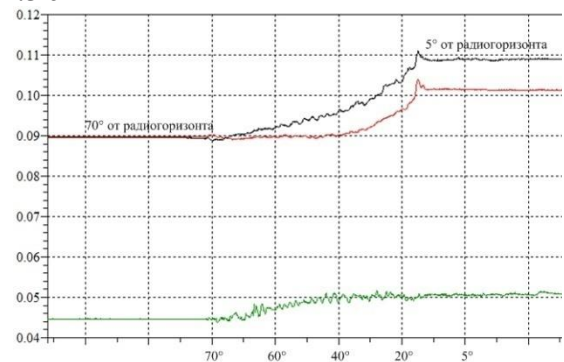
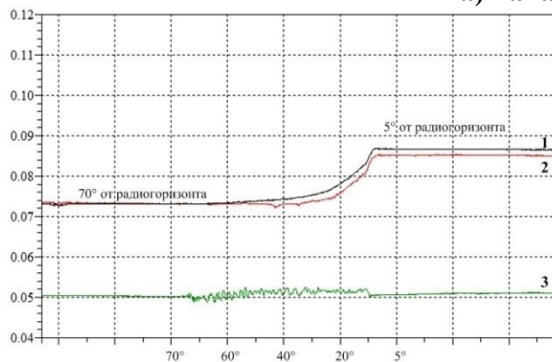
Измерение от 24.03.2017 г. 09:05:19  
(ясное небо 0/0) Н=90%, Т=+3°C.



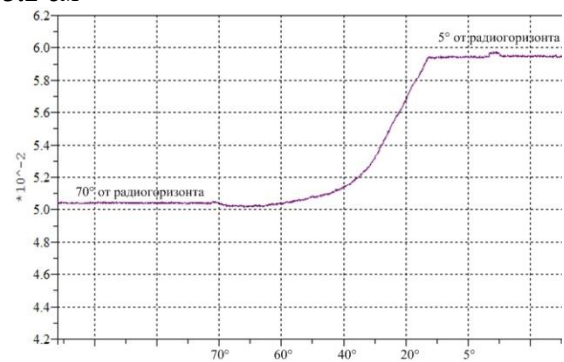
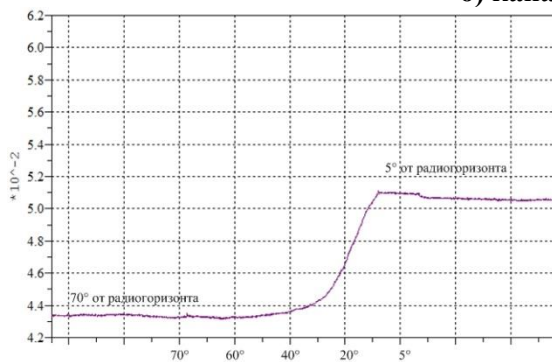
Измерение от 02.04.2017 г. 17:06:20  
(сплошная облачность 10/10) Н=66%, Т=+5°C.



а) каналы 7.5 см



б) каналы 3.2 см



в) каналы 1.35 см

**Рис. 2.** Результаты первичных измерений трехдиапазонной СВЧ радиометрической системы по методу угломестных разрезов радиотеплового излучения атмосферы при различных состояниях облачности от 70° до 5° к радиогоризонту: 1 – выходное напряжение основного канала при приеме на вертикальной поляризации; 2 – выходное напряжение основного канала при приеме на горизонтальной поляризации; 3 – выходное напряжение дополнительного канала формирования сигнала компенсации

Для анализа эффективности компенсации влияния фонового излучения был выполнен анализ соответствия экспериментальной угловой зависимости выходных сигналов радиометрической системы принятой теоретической, задаваемой выражением (2).

В таблице 1 представлены значения выходных напряжений многочастотной радиометрической системы в зависимости от угла визирования антенны  $h$ , для трех рабочих длин волн 1.35, 3.2, 7.5 см при приеме радиотеплового излучения безоблачной атмосферы.

**Таблица 1. Выходные сигналы измерительных каналов трехдиапазонной СВЧ радиометрической системы**

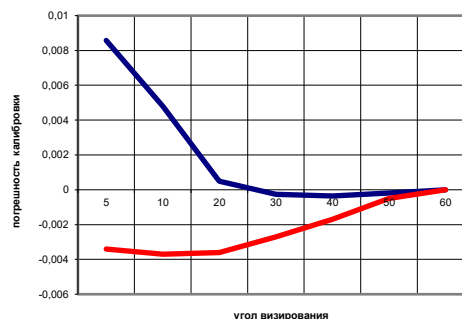
Углы визирования антенны, $h$	5°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°
$U_{\text{ВЫХ}}^{1.35 \text{ ОСН ВЕРТ}}$ , В	0.0510	0.0505	0.0465	0.0440	0.0435	0.0433	0.0432	0.0430
$U_{\text{ВЫХ}}^{3.2 \text{ ОСН ВЕРТ}}$ , В	0.0870	0.0840	0.0780	0.0750	0.0740	0.0730	0.0725	0.0720
$U_{\text{ВЫХ}}^{3.2 \text{ ОСН ГОР}}$ , В	0.0850	0.0810	0.0750	0.0740	0.0730	0.0720	0.0715	0.0710
$U_{\text{ВЫХ}}^{3.2 \text{ ДОП}}$ , В	0.0520	0.0518	0.0515	0.0510	0.0505	0.0502	0.0501	0.0500
$U_{\text{ВЫХ}}^{3.2 \text{ ОСН ВЕРТ}} - U_{\text{ВЫХ}}^{3.2 \text{ ДОП}}$ , В	0.0350	0.0320	0.0235	0.0240	0.0235	0.0228	0.0224	0.0220
$U_{\text{ВЫХ}}^{3.2 \text{ ОСН ГОР}} - U_{\text{ВЫХ}}^{3.2 \text{ ДОП}}$ , В	0.0330	0.0292	0.0235	0.0230	0.0225	0.0218	0.0214	0.0210
$U_{\text{ВЫХ}}^{7.5 \text{ ОСН ВЕРТ}}$ , В	0.0246	0.0230	0.0182	0.0170	0.0165	0.0163	0.0162	0.0160
$U_{\text{ВЫХ}}^{7.5 \text{ ОСН ГОР}}$ , В	0.0241	0.0230	0.0182	0.0170	0.0165	0.0163	0.0162	0.0160
$U_{\text{ВЫХ}}^{7.5 \text{ ДОП}}$ , В	0.0155	0.0150	0.0128	0.0113	0.0112	0.0111	0.0100	0.0100
$U_{\text{ВЫХ}}^{7.5 \text{ ОСН ВЕРТ}} - U_{\text{ВЫХ}}^{7.5 \text{ ДОП}}$ , В	0.0091	0.0080	0.0054	0.0057	0.0053	0.0052	0.0057	0.0040
$U_{\text{ВЫХ}}^{7.5 \text{ ОСН ГОР}} - U_{\text{ВЫХ}}^{7.5 \text{ ДОП}}$ , В	0.0086	0.0080	0.0054	0.0057	0.0053	0.0052	0.0057	0.0040

Для оценки погрешности наклонной калибровки по радиотепловому излучению безоблачной атмосферы были выполнены операции нахождения разности выходных

сигналов для разных углов визирования с целью компенсации в выходных сигналах постоянной составляющей, обусловленной собственными шумами системы. Результаты оценки погрешности наклонной калибровки в величинах уровней выходных сигналов по сравнению с теоретической угловой зависимостью (2) на длинах волн 3.2см и 7.5см с компенсацией и без компенсации влияния фонового шума представлены на рис. 3.



для каналов 3.2 см



для каналов 7.5 см

**Рис. 3. Результаты оценки погрешности наклонной калибровки микроволновой многодиапазонной радиометрической системы по радиотепловому излучению безоблачной атмосферы: синяя линия - калибровка по выходному сигналу основного канала, красная линия - калибровка по разностному сигналу основного и дополнительного каналов**

Анализ результатов оценки погрешности наклонной калибровки многочастотной радиометрической системы по радиотепловому излучению безоблачной атмосферы показал уменьшение величины ошибки наклонной калибровки по разностному сигналу системы при выполнении компенсации влияния фонового излучения при малых углах наклона линии визирования антенны к земной поверхности практически в два раза, что позволяет расширить возможности микроволновых систем при выполнении дистанционного зондирования атмосферы по методу угловых разрезов и повысить точность оценки радиояркостной температуры атмосферы особенно малых углах возвышения антенны.

Причем уменьшение ошибки калибровки наблюдалось как для диапазона 3,2см, так и для диапазона 7,5 см, но при разном знаке погрешности. Так для длины волны 3,2 см уровень разностного сигнала по величине превышал сигнал, задаваемый выражением (2), а на длине волны 7,5 см наоборот имел меньшие значения. Такое разнонаправленное отличие сигналов обусловлено реализацией двухканального приема радиотеплового излучения в каждом частотном диапазоне микроволновой радиометрической системой на общую антенную апертуру.

### Заключение

Экспериментальные исследования показали, что способ наклонной калибровки многочастотной микроволновой радиометрической системы с приемом на общую апертуру зеркальной антенны по радиотепловому излучению безоблачной атмосферы, позволяет реализовать одновременную калибровку системы во всех рабочих диапазонах, а процедура нахождения разностных сигналов при выполнении компенсации влияния фонового излучения приводит к уменьшению ошибки калибровки системы для направлений малых углов антенны по отношению к земной поверхности.

### Литература

1. Степаненко, В.Д. Радиотеплолокация 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. - М.: Луч, 1997. - 440с.
3. Yong Han, Ed R. Westwater Analysis and improvement of tipping calibration for ground-based microwave radiometers // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. - Vol.38. - No.3. - pp. 1260-1276.
4. 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.
5. Патент на изобретение №2300831 Способ снижения уровня шума антенны и двухмодовая апертурная антенна. // Федосеева Е.В., Ростокина Е.А., Ростокин И.Н. Оpubл.: 10.06.2007 Бюл. №16..
6. 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.
7. Есепкина, Н.А. Радиотелескопы и радиометры / Н.А. Есепкина, Д.В. Корольков, Ю.Н.Парийский. - М.: Наука, 1973. - 416 с.