

Использование радиотеплового излучения Солнца в качестве внешнего эталонного источника для калибровки многочастотной микроволновой радиометрической системы с компенсацией фоновых шумов

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

*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: rostockin.ilya@yandex.ru
Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского,
197198, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13,
E-mail: ggshchukin@mail.ru*

Рассмотрены основные вопросы, связанные с метрологическим обеспечением микроволновых радиометрических исследований облачной атмосферы, выполнено исследование способов внешней калибровки многочастотной микроволновой радиометрической системы с компенсацией фоновых шумов по радиотепловому излучению Солнца, решены вопросы его практической реализации и получены результаты оценки радиояркостной температуры по величине выходного напряжения радиометрической системы.

The main issues related to the metrological support of microwave radiometric studies of the cloudy atmosphere are considered, the methods for external calibration of a multi-frequency microwave radiometric system with background noise compensation by the solar thermal radiation of the Sun are studied, the questions of its practical implementation are solved, and the results of estimating the radio brightness temperature from the output voltage of the radiometric system are obtained.

Введение

Процедура калибровки радиометра является неотъемлемой частью каждого наблюдения. Процедура калибровки должна удовлетворять двум противоречивым требованиям. С одной стороны, длительность калибровочного сигнала должна быть достаточно большой для обеспечения достоверной оценки уровня калибровки, т.е. усиления канала. С другой стороны, увеличение длительности калибровки повышает вероятность проявления импульсных помех и тренда. Калибровка радиометрической системы обычно осуществляется по внутреннему полупроводниковому генератору шума [1].

Процедура калибровки радиометрической системы выполняется для установления однозначного соответствия между измеряемой радиояркостной температурой исследуемого объекта и выходным сигналом радиометрического приемника. Обычно калибровку радиометрической системы проводят отдельно для антенны и для радиометрического приемника [2].

Эталонные источники шумового излучения, применяемые для калибровки микроволновой радиометрической аппаратуры

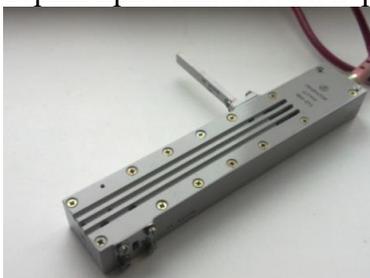
Основным прибором, используемым для калибровки радиометрических приемников, определения их чувствительности или измерения коэффициента шума системы, является полупроводниковый генератор шума (ГШ) (рис.1 а) с известной интенсивностью излучения.

Для измерения мощности шумовых сигналов с помощью радиометра полная схема последнего включает в себя стандартный источник напряжения, который может быть подключен вместо антенны и использован для калибровки радиометрического приемника. В качестве таких источников используют генераторы шума, потому что их

спектр излучения достаточно полно отображает спектр принимаемого радиотеплового излучения. Поэтому при использовании генераторов шума форма частотной характеристики радиометрического приемника не влияет на результаты измерений.

В зависимости от вида исследуемого объекта и типа приемника могут применяться различные средства калибровки и способы их аттестации.

В качестве исходных 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».



а) высокотемпературный газоразрядный генератор шума ГШ-6



б) высокотемпературные полупроводниковые генераторы шума на ЛПД серии М31305



в) COLFET–низкотемпературный полупроводниковый калибровочный источник



г) низкотемпературный, охлаждаемый азотом генератор шума



д) низкотемпературные широкоапертурные излучатели серии НШИ



Рис. 1 Наиболее распространенные эталонные источники шумового излучения

Генераторы шума обеспечивают контроль стабильности коэффициента усиления радиометра и коэффициентов, входящих в алгоритмы вычисления измеряемых яркостных температур. В качестве встраиваемых в радиометр опорных генераторов шума применяют хорошо согласованные нагрузки, температура которых, обычно равная температуре элементов радиометра.

Современным аналогом низкотемпературного эталонного источника на основе жидкого азота (рис. 1 г) является, полупроводниковый эталонный источник на основе COLFET – эффекта.

COLFET (рис. 1 в) – это полупроводниковый аналог генератора шума на основе жидкого азота. Работает при комнатной температуре, поэтому не требуется криогенного оборудования. Излучает шумовую температуру от 33 до 60 К в диапазоне 20-24 ГГц, регулятор напряжения питания обеспечивает постоянство шумовой температуры вывода энергии.

Низкотемпературные широкоапертурные излучатели (НШИ) (рис. 1 д) выпускаемые ФГУП «ВНИИФТРИ» используются в качестве эталонных и рабочих мер радиояркостных температур при первичной калибровке микроволновых радиометров в диапазоне частот от 3 до 220 ГГц и имеют коэффициент излучения от 0,9985 до 0,99997 и шумовую температуру кипения чистого жидкого азота $\approx 77,0$ К в зависимости от атмосферного давления, определяемую по следующему соотношению

$$T_N = 77,36 + 0,011(p - 760), \quad (1)$$

где p – атмосферное давление, мм.рт.ст.

Конструктивно НШИ представляют собой замкнутый объем, внутри которого помещен излучатель, выполненный из монокремния и охлаждаемый чистым жидким азотом, линейка выпускаемых НШИ, отличается диаметрами излучающих апертур (100, 210, 300 и 500 мм) и частотами аттестации.

Все вышеперечисленные 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.

Использование радиотеплового излучения Солнца в качестве эталонного источника

Радиотепловое излучение Солнца определяется физическими процессами, происходящими в его недрах и, главным образом, в его верхних слоях, а также структурой этих слоев, состоящих из фотосферы, хромосферы и короны [3].

Радиоизлучение Солнца имеет две составляющих: радиотепловое излучение спокойного Солнца и нетепловое спорадическое радиоизлучение.

Тепловой характер радиоизлучения обусловлен тем, что магнитные поля в хромосфере и короне спокойного Солнца малы, а кинетическая температура ионизированного газа достаточно велика, т.е. присутствует горячая плазма в слабом магнитном поле, наиболее эффективным механизмом излучения, которой является тормозное излучение. [4].

Выражение для определения радиояркостной температуры спокойного Солнца, микроволновым радиометрическим методом, можно записать в следующем виде

$$T_{\odot} = \frac{\varepsilon_M T_{\text{СМВ}} \left(Y - 2^{-\delta_{\odot}^2 / \delta_{\text{HPBW}}^2} \right) + (Y - 1) (\varepsilon_M T_{\text{АТМ}} (L_{\text{АТМ}} - 1) + (T_{\text{RCVR}} + T_{\text{SPILL}}) L_{\text{АТМ}})}{\varepsilon_M \left(1 - 2^{-\delta_{\odot}^2 / \delta_{\text{HPBW}}^2} \right)}, \quad (2)$$

где δ_{\odot}^2 - угловой размер Солнца, равный 0,5 градуса; ε_M - эффективность главного лепестка ДН антенны,

$$\varepsilon_M = \frac{\delta_{\text{HPBW}}^2}{16 \ln 2} D_{\text{МАХ}}, \quad (3)$$

где δ_{HPBW}^2 - ширина диаграммы направленности по уровню половинной мощности, в радианах; если ширина диаграммы направленности задается в градусах, то

$$\varepsilon_M = \frac{\pi^2}{518400 \ln 2} \delta_{\text{HPBW}}^2 D_{\text{MAX}}, \quad (4)$$

D_{MAX} - усиление антенны в максимуме,

$$D_{\text{MAX}} = N \frac{16 \ln 2}{\delta_{\text{HPBW}}^2}, \quad (5)$$

N - нормировочный множитель, $N = \varepsilon_M$;

T_{CMB} - температура фонового реликтового космического излучения, (cosmic microwave background - CMB), $T_{\text{CMB}} \approx 2,725$ К;

Y -фактор, определяет отношение уровня максимума шумового сигнала на выходе приемника при ориентации антенны на Солнце к уровню сигнала, когда главный лепесток ориентирован на «холодное небо»,

$$Y = \frac{T_{\text{HOT}} + T_{\text{SYS}}}{T_{\text{COLD}} + T_{\text{SYS}}}, \quad (6)$$

где T_{HOT} - температура шумового сигнала в апертуре антенны при ее ориентации на Солнце,

$$T_{\text{HOT}} = \frac{\varepsilon_M}{L_{\text{ATM}}} \left(2^{-\delta_{\odot}^2 / \delta_{\text{HPBW}}^2} T_{\text{CMB}} + \left(1 - 2^{-\delta_{\odot}^2 / \delta_{\text{HPBW}}^2} \right) T_{\text{SUN}} \right) + \varepsilon_M \left(1 - \frac{1}{L_{\text{ATM}}} \right) T_{\text{ATM}}, \quad (7)$$

где L_{ATM} - затухание в атмосфере; T_{ATM} – шумовая температура атмосферы; T_{COLD} - температура шумового сигнала в апертуре антенны при ее ориентации на «холодное небо»,

$$T_{\text{COLD}} = \frac{\varepsilon_M}{L_{\text{ATM}}} T_{\text{CMB}} + \varepsilon_M \left(1 - \frac{1}{L_{\text{ATM}}} \right) T_{\text{ATM}}, \quad (8)$$

T_{SYS} - температура собственного шума приемной системы,

$$T_{\text{SYS}} = T_{\text{RCV}} + T_{\text{SPIL}}, \quad (9)$$

где T_{RCV} - шумовая температура микроволнового радиометрического приемника, T_{SPIL} – фоновая шумовая температура антенны, приходящая по боковым и задним лепесткам ДН.

Координаты Солнца (A - азимут и h - угол места) в момент наблюдения расчетным путем можно определить, используя следующие выражения [5]

$$A = \pi + \arcsin \left(\frac{\cos \beta \cos \alpha}{\cosh} \right), \quad (10)$$

$$h = \arcsin (\sin\varphi \sin\beta + \cos\varphi \cos\beta \cos\alpha), \quad (11)$$

где β – склонение Солнца на момент наблюдения,

$$\beta = 0,4092 \sin[2\pi(D - 0,219)], \quad (12)$$

для високосного года

$$\beta = 0,4092 \sin[2\pi(D - 0,216)], \quad (13)$$

$$D = N/365,2425, \quad (14)$$

N - порядковый номер дня, отсчитываемый от начала года; α – часовой угол Солнца, отсчитываемый от истинного полдня,

$$\alpha = (t - 16)0,261799 + \lambda + T \text{—для летнего времени,}$$

$$\alpha = (t - 15)0,261799 + \lambda + T \text{—для зимнего времени;}$$

t —московское время момента наблюдения, ч; λ - долгота позиции микроволновой радиометрической системы;

$$T = 0,0328 \sin[2\pi(D - 0,01)] + 0,0698 \sin[4\pi(D - 0,474)] \quad (15)$$

Экспериментальные исследования радиотеплового излучения Солнца

В данном разделе представлены результаты практических исследований направленных свойств антенной системы многочастотной микроволновой радиометрической системы, заключающиеся в измерении экспериментальных диаграмм направленности многочастотной двухмодовой антенной системы по основному измерительному каналу на двух линейных поляризациях (вертикальная и горизонтальная) и дополнительному измерительному каналу с преимущественным приемом фонового излучения приходящего по боковым лепесткам, измерения направленных свойств проводились в дальней зоне антенной системы в условиях открытого полигона, в качестве источников квазитеплового излучения использовались полупроводниковые генераторы шума соответствующих частотных диапазонов, а также естественные источники радиотеплового излучения [6, 7].

При использовании данного метода измерения ДН антенна остается неподвижной относительно поверхности Земли, тем самым исключаются возможные изменения уровня фонового излучения атмосферы и подстилающей поверхности, образующегося благодаря задним и боковым лепесткам ДН исследуемой антенны, а изменение уровня принимаемого излучения Солнца происходит благодаря вращению Земли вокруг Солнца.

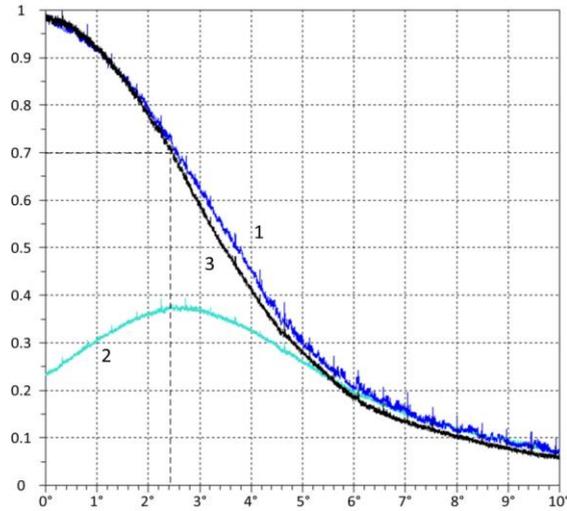


Рис. 2 - Канал 7.5 см ДН по Солнцу от 23.03.2017 г. : 1 – волна H_{11} (ОСН – канал горизонтальной поляризации), 2 - волна E_{01} (ДОП – канал), 3 – волна H_{11} (ОСН – канал вертикальной поляризации)

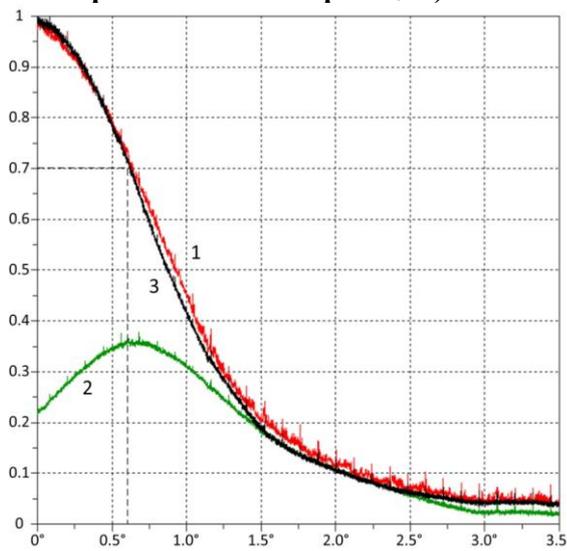


Рис. 3 - Канал 3.2 см ДН по Солнцу от 23.03.2017 г. : 1 – волна H_{11} (ОСН – канал горизонтальной поляризации), 2 - волна E_{01} (ДОП – канал), 3 – волна H_{11} (ОСН – канал вертикальной поляризации)

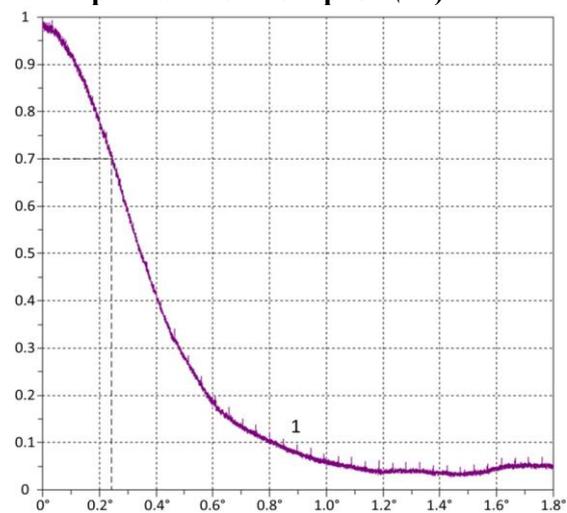


Рис. 4 - Канал 1.35 см ДН по Солнцу от 23.03.2017 г. : 1 – волна H_{11} (ОСН – канал горизонтальной поляризации)

Заключение

В случае использования остронаправленных зеркальных антенн с высоким коэффициентом усиления, имеющих большие излучающие апертуры с размерами раскрыва от 1000 до 5000 мм, встает задача внешней калибровки микроволновой радиометрической аппаратуры совместно с антенной системой.

Применение апертурных излучателей расположенных в дальней зоне диаграммы направленности антенны сопряжено со значительными трудностями наведения и требуют больших антенных полигонов.

В данном случае наиболее целесообразным методом калибровки микроволновой радиометрической измерительной аппаратуры совместно с антенной системой может стать использование естественных эталонов спектральной плотности энергетической яркости (СПЭЯ). В качестве которых, традиционно используют астрономические источники (реликтовое космическое излучение, излучение звезд и планет или их спутников) или излучение безоблачной атмосферы.

Литература

1. Радиотеплокация в метеорологии / В.Д. Степаненко, Г.Г.Щукин, Л.П. Бобылев, С.Ю. Матросов. – Л.: Гидрометеиздат, 1987 – 283 с.
2. В.В.Фалин Радиометрические системы СВЧ - М.: Луч, 1997. - 440с.
3. Юрчук Э.Ф., Арсаев И.Е. Обеспечение единства измерений в микроволновой радиометрии. // Измерительная техника, №1, 2009, С.51-56.
4. Цейтлин Н.М. Антенная техника и радиоастрономия. – М.: Сов. Радио, 1976. – 352 с.
5. РД 52.04.320 - 91 Руководство по производству наблюдений и применению информации с неавтоматизированных радиолокаторов МРЛ-1, МРЛ-2 и МРЛ-5. -СПб.: Гидрометеиздат, 1993. -357 с.
6. Fedoseeva E.V., Rostokin I.N., Schukin G.G. Rostokina E.A Study of the Processes of Formation and Development of Dangerous Atmospheric Meteorological Phenomena Associated With the Evolution of Convective Cloud Cover. // 2019 Russian Open Conference on Radio Wave Propagation (RWP) Kazan, Russia1-6 July 2019, IEEE Catalog - P 380 - 383 DOI: 10.1109 / RWP.2019.8810385.
7. Rostokin I.N., Fedoseeva E.V., Schukin G.G. Rostokina E.A. Multifrequency Microwave Radiometric Method of Detection and Control of Dangerous Atmospheric Weather Events, Resistant to Changing Measurement Conditions. // 2019 Russian Open Conference on Radio Wave Propagation (RWP) Kazan, Russia1-6 July 2019 2, IEEE Catalog, Page(s): 384 - 387 DOI: 10.1109/RWP.2019.8810166.