

Особенности калибровки СВЧ радиометрической системы с компенсацией фоновых шумов по собственному радиотепловому излучению атмосферы

¹Е.В.Федосеева, ¹И.Н. Ростокин, ²Г.Г.Щукин, ¹Е.А. Ростокина

¹Муромский 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

²Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского,
197198, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13, E-mail: ggshchukin@mail.ru

Рассмотрены базовые положения внешней калибровки СВЧ радиометрической системы по угловой зависимости радиотеплового излучения безоблачной атмосферы. Проанализировано влияние фоновых шумов на погрешность калибровки в системе без компенсации и с компенсацией их влияния. Предложен способ оценки степени соответствия результатов измерений требованиям внешней калибровки по относительным приращениям выходных сигналов СВЧ радиометрической системы. Проанализированы результаты измерений радиотеплового излучения безоблачной атмосферы трехдиапазонной СВЧ радиометрической системы с компенсацией влияния фоновых шумов при разных углах возвышения антенны.

The basic provisions of the external calibration of the microwave radiometric system on the angular dependence of the radiothermal radiation of a cloudless atmosphere are considered. The influence of background noise on the calibration error in the system with compensation and without compensation of their influence is analyzed. A method for assessing the degree of satisfaction of the measurement results with the requirements of external calibration by the relative increments of the output signals of the microwave radiometric system is proposed. The results of measurements of radiothermal radiation of cloudless atmosphere of the tri-band microwave radiometric system with compensation of the influence of background noise at different angles of elevation of the antenna are analyzed.

Введение

Интенсивность радиотеплового излучения, создаваемого физическими средами, принято численно характеризовать величиной радиояркостной температуры. Поэтому решение задач оценки параметров среды по создаваемому ей радиотепловому излучению предполагает нахождение соответствия выходных сигналов СВЧ радиометрических систем и радиояркостных температур области зондирования, т.е. решение задачи калибровки системы [1].

Калибровка может выполняться отдельно для приемника - внутренняя или для системы в целом, включая антенну, - внешняя. Для внутренней калибровки известен и широко распространен метод введения дополнительного шумового сигнала от источников с точно определенной спектральной плотностью энергетической яркости - радиояркостной температурой [2].

Для внешней калибровки должны быть в наличие апертурные источники шумового сигнала с фиксированной радиояркостной температурой, что не всегда можно реализовать на практике, особенно для систем с узконаправленными антеннами с большими размерами апертуры. Это сопряжено со значительными трудностями наведения и необходимостью наличия больших антенных полигонов.

Решение задачи внешней калибровки особенно актуально для мобильных СВЧ радиометрических систем дистанционного зондирования атмосферы с необходимостью выполнения измерений в изменяющихся условиях наземного базирования. В таком случае целесообразно рассмотреть метод калибровки СВЧ радиометрической системы в целом, включая антенну, по излучению безоблачной атмосферы [3]. Известно применение угловой зависимости радиояркой температуры безоблачной атмосферы для определения соответствия отсчетных уровней выходных сигналов СВЧ радиометрической системы значениям радиояркой температуры, так называемая "tipping" калибровка [3-4] для СВЧ радиометрических систем дистанционного зондирования атмосферы при наземном базировании.

В данной статье рассматриваются особенности "tipping" калибровки СВЧ радиометрической системы с компенсацией фоновых шумов. Такая компенсация, реализуемая при двухканальном приеме с формированием дополнительного сигнала компенсации адекватного принимаемому излучению по области рассеяния диаграммы направленности основного антенного канала [5-6], позволяет уменьшить влияние фоновых шумов на результаты измерений, особенно при изменяющихся условиях проведения СВЧ радиометрических дистанционного зондирования.

Математические основы калибровки СВЧ радиометрической системы с компенсацией фоновых шумов по излучению безоблачной атмосферы

В основу "tipping" калибровки СВЧ радиометрической системы положена угловая зависимость радиояркой температуры безоблачной атмосферы от угла возвышения $T_{яркатм}(\theta)$, которая в первом приближении может быть задана в виде [7]

$$T_{яркатм}(\theta) = T_{яркзенит} / \sin(\theta), \quad (1)$$

где $T_{яркзенит}$ – радиояркая температура атмосферы в зените ($\theta = 90^\circ$); θ – угол возвышения антенны.

Антенная температура СВЧ радиометрической системы при зондировании атмосферы для угла возвышения θ определяется выражением

$$T_A(\theta) = \bar{T}_{яркгл}(\theta)(1 - \beta)\eta + \bar{T}_{яркбок}\beta\eta + (1 - \eta)T_0, \quad (2)$$

где $\bar{T}_{яркгл}(\theta)$ – радиояркая температура атмосферы, усредненная по угловой области главного лепестка диаграммы направленности антенны для угла возвышения θ ; $\bar{T}_{яркбок}$ – радиояркая температура окружающей антенну среды, усредненная по области рассеяния диаграммы направленности антенны; β – коэффициент рассеяния диаграммы направленности антенны; η – КПД антенны; T_0 – термодинамическая температура антенны.

Согласно (2) входной сигнал радиометрического приемника зависит не только от измеряемой величины $\bar{T}_{яркгл}(\theta)$, но и от параметров антенны и излучательных свойств окружающей антенну среды, которые неоднородны в пространстве. При изменении угла возвышения антенны в общем случае изменяется и величина $\bar{T}_{яркбок}$, что может влиять на погрешность калибровки системы.

В СВЧ радиометрической системе с компенсацией фоновых шумов каждому значению радиояркой температуры атмосферы для определенного угла

возвышения антенны ставится в соответствие разность антенных температур основного измерительного и дополнительного каналов [3]

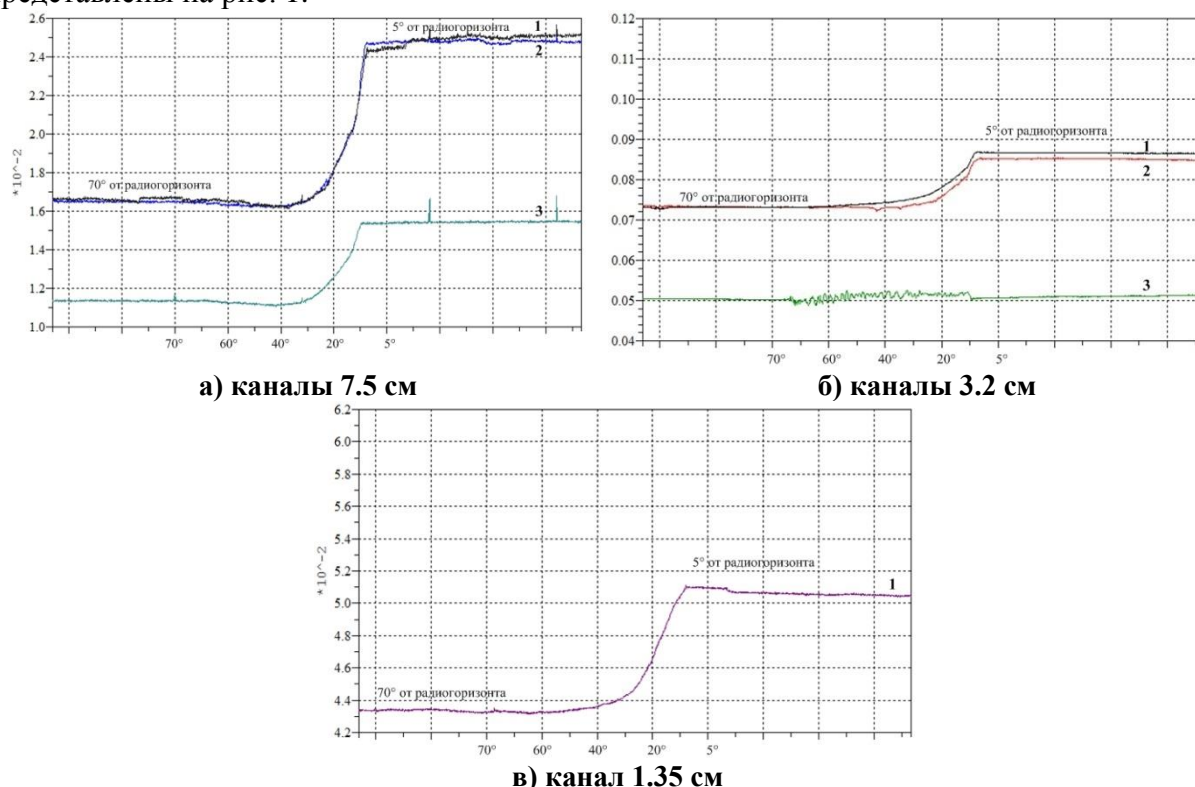
$$\Delta T_A(\theta) = T_{Aосн}(\theta) - T_{Aдоп}(\theta) = \bar{T}_{яркгл}((1 - \beta_{осн})\eta_{осн} - (1 - \beta_{доп})\eta_{доп}) + \bar{T}_{яркбок}(\beta_{осн}\eta_{осн} - \beta_{доп}\eta_{доп}) \quad (3)$$

где $\beta_{осн}$, $\beta_{доп}$, $\eta_{осн}$, $\eta_{доп}$ – параметры основного и дополнительного антенных каналов СВЧ радиометрической системы с компенсацией фоновых шумов.

Наличие во втором слагаемом выражения (3) разности параметров антенных каналов $(\beta_{осн}\eta_{осн} - \beta_{доп}\eta_{доп})$ определяет возможность уменьшения погрешности калибровки СВЧ радиометрической системы при смене угла возвышения антенны.

Экспериментальные исследования угловой зависимости радиотеплового излучения безоблачной атмосферы

Результаты измерений радиотеплового излучения безоблачной атмосферы трехдиапазонной СВЧ радиометрической системой с компенсацией фоновых шумов представлены на рис. 1.



**Рис. 1 Выходные сигналы СВЧ радиометрической системы с компенсацией фоновых шумов при измерении радиотеплового излучения безоблачной атмосферы при углах возвышения антенны от 70° до 5°: 1 – ОСН ВЕРТ; 2 – ОСН ГОР; 3 – ДОП
Измерение от 24.03.2017 г. 09:05:19 (ясное небо 0/0) H=90%, T=+3°C.**

В таблице 1 представлены численные значения выходных сигналов трехдиапазонной СВЧ радиометрической системы с приемом по основным и дополнительным каналам, соответствующие графикам рис.1.

Таблица 1 – Выходные сигналы измерительных каналов

Углы возвышения антенны, θ	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
$U_{\text{ВЫХ}}^{3.2 \text{ ОСН ВЕРТ}} - U_{\text{ВЫХ}}^{3.2 \text{ ДОП}}$, 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
$U_{\text{ВЫХ}}^{7.5 \text{ ОСН ВЕРТ}} - U_{\text{ВЫХ}}^{7.5 \text{ ДОП}}$, 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

Оценка влияния фоновых шумов на калибровку СВЧ радиометрической системы

При отсутствии изменения вклада фоновых шумов в антенную температуру СВЧ радиометрической системы для разных углов возвышения антенны разность антенных температур при измерении радиотеплового излучения безоблачной атмосферы может быть задана выражением

$$\Delta T(\theta_1, \theta_2) = T_A(\theta_1) - T_A(\theta_2) = \left(\frac{T_{\text{яркзениит}}}{\sin \theta_1} - \frac{T_{\text{яркзениит}}}{\sin \theta_2} \right) (1 - \beta) \eta = A \left(\frac{1}{\sin \theta_1} - \frac{1}{\sin \theta_2} \right), \quad (4)$$

где $A = T_{\text{яркзениит}} (1 - \beta) \eta = \text{const}$.

При наличии еще одной разности антенных температур $\Delta T(\theta_3, \theta_4)$ можно определить параметр $k(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4)$, не зависящий от радиояркостной температуры атмосферы в зените и от параметров антенны,

$$k(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4) = \frac{\Delta T(\theta_1, \theta_2)}{\Delta T(\theta_3, \theta_4)} = \left(\frac{1}{\sin \theta_1} - \frac{1}{\sin \theta_2} \right) / \left(\frac{1}{\sin \theta_3} - \frac{1}{\sin \theta_4} \right), \quad (5)$$

Сравнительный анализ степени близости численных оценок отношений приращений выходных сигналов СВЧ радиометрической системы $\Delta U(\theta_1, \theta_2) / \Delta U(\theta_3, \theta_4)$ к теоретической величине параметра $k(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4)$ позволяет косвенно оценить влияние параметров системы и условий проведения измерений на погрешность калибровки СВЧ радиометрической системы по радиотепловому излучению безоблачной атмосферы.

Для оценки возможности применения результатов измерений угловой зависимости радиотеплового излучения безоблачной атмосферы (Таблица 1) для калибровки СВЧ радиометрической системы были выбраны данные измерений по угловым направлениям 70°, 60°, 30°, 20° и 10°, для которых параметр $k(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4)$ равен $k(70^\circ, 60^\circ, 30^\circ, 20^\circ) = 0,098$ и $k(70^\circ, 60^\circ, 30^\circ, 10^\circ) = 0,024$. По данным Таблицы 1 были рассчитаны значения $\Delta U(70^\circ, 60^\circ) / \Delta U(30^\circ, 20^\circ)$ и $\Delta U(70^\circ, 60^\circ) / \Delta U(30^\circ, 10^\circ)$ для трех частотных каналов СВЧ радиометрической системы с компенсацией и без компенсации фоновых шумов. Результаты расчетов приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Оценки относительных приращений выходных сигналов СВЧ радиометрической системы

Приращения выходных сигналов системы	Частотные каналы СВЧ радиометрической системы								
	1.35см верт осн	3,2см гор осн	3,2см гор осн- доп	3,2см верт осн	3,2см верт осн- доп	7,5см гор осн	7.5см гор осн- доп	7,5см верт осн	7,5см верт осн- доп
$\Delta U(70^0, 60^0)$	0,0002	0,0005	0,0001	0,0023	0,0004	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002
$\Delta U(30^0, 20^0)$	0,0025	0,001	0,0005	0,003	0,0005	0,0012	0,0013	0,0012	0,0013
$\Delta U(30^0, 10^0)$	0,0065	0,007	0,0062	0,009	0,008	0,006	0,0026	0,006	0,0026
$\frac{\Delta U(70^0, 60^0)}{\Delta U(30^0, 20^0)}$	0,08	0,5	0,8	0,767	0,8	0,16	0,154	0,16	0,154
$\frac{\Delta U(70^0, 60^0)}{\Delta U(30^0, 10^0)}$	0,0308	0,0714	0,0645	0,256	0,05	0,033	0,056	0,033	0,056

Анализ полученных результатов таблицы 2 показывает, что наилучшее приближение относительных приращений выходных сигналов $\Delta U(70^0, 60^0) / \Delta U(30^0, 20^0)$ и $\Delta U(70^0, 60^0) / \Delta U(30^0, 10^0)$ к теоретическим оценкам параметров $k(70^0, 60^0, 30^0, 20^0) = 0,098$ и $k(70^0, 60^0, 30^0, 10^0) = 0,024$ имеет место для канала с центральной длиной волны 1.35см, что может быть объяснено наибольшей направленностью антенны на данной длине волны. Для каналов с центральными длинами волн 3.2см и 7.5см большее приближение к теоретическим значениям оценочного параметра $k(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4)$ показало относительное приращение выходных сигналов системы $\Delta U(70^0, 60^0) / \Delta U(30^0, 10^0)$, причем порядок численных величин с компенсацией и без нее приблизительно одинаков, но практически для обеих поляризаций и обоих каналов при выполнении компенсации величина $\Delta U(70^0, 60^0) / \Delta U(30^0, 10^0)$ ближе к теоретическому значению параметра $k(70^0, 60^0, 30^0, 10^0) = 0,024$.

Заключение

Экспериментальные исследования доказали, что способ калибровки трехдиапазонной СВЧ радиометрической системы по радиотепловому излучению безоблачной атмосферы применим для системы во всех рабочих диапазонах с компенсацией фоновых шумов. Причем выполненные оценки определили возможность оптимизации процедуры по выбору углов возвышения антенны с общей апертурой для трех частотных каналов для формирования необходимого количества отсчетных точек для калибровки СВЧ радиометрической системы в целом.

Литература

1. Радиотеплолокация 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. Han Yong and 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, 2000, PP.1260-1276.

4. Jieying He, Shengwei Zhang The Improved Calibration Method and Retrieval Models Using Advanced Ground-based Multi-frequency Microwave Sounder. Remote Sensing Science, November 2013, Volume 1, Issue 3, PP.27-40.
5. 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
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.