

Калибровка трёхдиапазонной сверхвысокочастотной радиометрической системы с компенсацией фоновых шумов

Е. В. Федосеева¹, Г. Г. Щукин², И. Н. Ростокин¹

¹Муромский институт (филиал) ВПО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», Муром, Владимирская область, Российская Федерация, e-mail: elenafedosееva@yandex.ru, rostokin.ilya@yandex.ru

²Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: ggshchukin@mail.ru

Показано, что для сверхвысокочастотных радиометрических систем дистанционного зондирования природных сред важен вопрос однозначного определения соответствия выходного сигнала значению радиояркой температуры зондируемой области, по которой выполняется оценка физических параметров. Сверхвысокочастотные радиометрические системы работают в условиях действия внешних помех и фоновых шумов. В настоящей статье исследовано влияние фоновых шумов на внешнюю калибровку сверхвысокочастотной радиометрической системы по внешнему «детерминированному» источнику шумового сигнала. Проанализированы условия выполнения калибровки в системе с компенсацией влияния фоновых шумов. Выполненный анализ выходного сигнала сверхвысокочастотной радиометрической системы показал существенное влияние фоновых шумов на параметр, определяющий начало отсчёта шкалы приёмника. Рассмотрена возможность снижения помехового действия фоновых шумов на результаты измерений в сверхвысокочастотной радиометрической системе с двухканальной антенной, работающей на двух модах круглого волновода. Показано, что на выходе антенны формируется дополнительный сигнал компенсации. Проведена аналитическая оценка степени компенсации влияния фоновых шумов на выходной разностный сигнал системы. Выполнен численный анализ погрешности внешней калибровки трёхдиапазонной сверхвысокочастотной радиометрической системы с компенсацией фоновых шумов при приёме радиотеплового излучения на общую апертуру антенны.

Ключевые слова: сверхвысокочастотная радиометрическая система, калибровка по радиотепловому излучению атмосферы, радиояркая температура, компенсация фоновых шумов.

Введение. Сверхвысокочастотные (СВЧ) радиометрические измерения мощности радиотеплового излучения сред и объектов позволяют дистанционно оценивать их физические параметры. Микроволновое радиометрическое зондирование атмосферы даёт возможность получить обширную информацию о метеопараметрах, таких как температура, влажность, водо- и влагосодержание, скорость передвижения воздушных масс и т. д. [1–6].

Решение обратных задач микроволновой радиометрии атмосферы, т. е. оценка метеопараметров по результатам СВЧ-радиометрических измерений, основано на применении полуэмпирических моделей, в основе которых лежат регрессионные соотношения взаимосвязи с радиояркой температурой – интегральной характеристикой интенсивности излучения в микроволновом диапазоне [1–8]. Поэтому для решения задач оценки метеопараметров атмосферы по данным микроволновой радиометрии необходимо калибровать СВЧ-радиометрические системы для нахождения однозначного соответствия выходного сигнала системы и радиояркой температуры [1, 9–14].

Калибровка СВЧ-радиометрической системы осложняется из-за ограниченной пространственной избирательности антенны и приёма системой радиотеплового излучения сразу всего окружающего систему пространства (фоновых шумов) с угловой функцией передачи, задаваемой диаграммой направленности. В настоящей статье авторы исследуют влияние фоновых шумов на внешнюю калибровку СВЧ-радиометрической системы и анализируют условия выполнения калибровки в системе с компенсацией этого влияния.

Анализ составляющих выходного сигнала СВЧ-радиометрической системы. При приёме радиотеплового излучения СВЧ-радиометрической системой на выходе антенны формируется сигнал, который в заданной полосе частот сопоставляется по мощности с шумовым сигналом. Данный шумовой сигнал создаётся сопротивлением, имеющим определённую термодинамическую температуру. Сигнал на выходе антенны определяется в единицах температурной шкалы и характеризуется как антенная температура T_a . Антенная температура зависит от излучательных

свойств окружающего антенну пространства и диаграммы направленности антенны [15, 16]:

$$T_a(\theta_0, \varphi_0) = \frac{\iint_{4\pi} T_{я}(\theta, \varphi) F(\theta - \theta_0, \varphi - \varphi_0) \sin\theta d\theta d\varphi}{\iint_{4\pi} F(\theta, \varphi) \sin\theta d\theta d\varphi} \eta + T_0(1 - \eta), \quad (1)$$

где $T_{я}(\theta, \varphi)$ – пространственное распределение радиояркостной температуры; $F(\theta, \varphi)$ – диаграмма направленности антенны; θ_0, φ_0 – направление зондирования, совпадающее с направлением максимума диаграммы направленности антенны; η – коэффициент полезного действия антенны; T_0 – термодинамическая температура антенны.

Для обобщённой оценки составляющих антенной температуры запишем выражение (1) в следующем виде [16]:

$$T_a = T_{я.гп}(1 - \beta)\eta + T_{ф}\beta\eta + T_0(1 - \eta), \quad (2)$$

$$\beta = 1 - \frac{\iint_{\theta_{гп}, \varphi_{гп}} F(\theta, \varphi) \sin\theta d\theta d\varphi}{\iint_{4\pi} F(\theta, \varphi) \sin\theta d\theta d\varphi},$$

где $T_{я.гп}$ – радиояркостная температура зондируемой области пространства, усреднённая по области главного лепестка диаграммы направленности антенны; β – коэффициент рассеяния антенны; $\theta_{гп}, \varphi_{гп}$ – угловая область главного лепестка диаграммы направленности антенны; $T_{ф}$ – радиояркостная температура фонового излучения окружающего антенну пространства, усреднённая по области рассеяния диаграммы направленности антенны.

Вычислим антенную температуру на входе приёмника СВЧ-радиометрической системы с учётом влияния фидера:

$$T_{а.пр} = T_a(1 - \gamma) + T_{0ф}\gamma, \quad (3)$$

где γ – коэффициент потерь в антенно-фидерном тракте; $T_{0ф}$ – термодинамическая температура фидера.

Сигнал на выходе приёмника СВЧ-радиометрической системы при условии квадратичного режима работы детектора определяется линейным соотношением между выходным сигналом и антенной температурой на входе радиометра, а также собственной шумовой температурой радиометра $T_{ш.пр}$:

$$U_{вых} = kT_{а.пр} + T_{ш.пр},$$

где k – коэффициент передачи приёмника СВЧ-радиометрической системы.

С учётом формул (2), (3) выражение для выходного сигнала с выделением составляющей, обусловленной приёмом радиотеплового излучения из области зондирования, т. е. области главного лепестка диаграммы направленности антенны, принимает вид

$$U_{вых} = k(1 - \beta)(1 - \gamma)\eta T_{я.гп} + k\beta\eta(1 - \gamma)T_{ф} + kT_0(1 - \eta) + kT_{0ф}\gamma + T_{ш.пр}. \quad (4)$$

Особенности внешней калибровки СВЧ-радиометрической системы с учётом влияния фоновых шумов. В результате калибровки СВЧ-радиометрической системы должно быть получено выражение, определяющее однозначное соответствие между выходным сигналом и радиояркостной температурой в направлении оси антенны.

Известные подходы к калибровке СВЧ-радиометрических систем по внешним «детерминированным» источникам радиотеплового излучения основаны на предположении о линейной взаимосвязи измеряемой радиояркостной температуры и выходного сигнала системы [1, 9, 11]:

$$U_{вых} = ST_{я.гп} + U_0, \quad (5)$$

где S, U_0 – соответственно крутизна шкалы приёмника СВЧ-радиометрической системы и начало отсчёта его шкалы (определяются в процессе калибровки).

Сопоставление выражений (4), (5) указывает на существование в параметре U_0 составляющей, обусловленной приёмом фоновых шумов. Данная составляющая зависит не только от излучательных свойств окружающего систему пространства, но и от относительного вклада фоновых шумов в антенную температуру. Этот вклад может варьироваться в зависимости от взаимного расположения неоднородностей окружающего пространства и антенны. Значительное изменение угла высоты антенны при зондировании атмосферы приведёт к изменению вклада фоновых шумов от подстилающей поверхности.

Таким образом, условия выполнения точной калибровки СВЧ-радиометрической системы по внешним «детерминированным» источникам следующие:

наличие двух «детерминированных» источников с известной радиояркостной температурой и угловым размером, равным угловому размеру главного лепестка диаграммы направленности антенны. Тогда при измерении мощности радиотеплового излучения, создаваемого этими источниками, вклад фоновых шумов в антенную температуру СВЧ-радиометрической системы будет одинаков и соответствовать аналогичному вкладу при зондировании атмосферы;

неизменность условий измерений (характера и состояния подстилающей поверхности) с точки зрения создания фоновых шумов или возможность выполнения разностных измерений с компенсацией влияния фоновых шумов в разностном сигнале системы, например реализация измерений радиояркостного контраста области зондирования.

Условия существования двух источников радиотеплового излучения с «детерминированной» радиояркостной температурой и неизменности уровня фоновых шумов реализуемы при калибровке и последующих измерениях на специальном полигоне, где размещены пространственно-разнесённые широкоапертурные источники теплового

излучения с возможностью регулировки их температуры. В качестве природных источников радиотеплового излучения можно использовать реперные области пространства с достаточно стабильной радиояркой температурой (лесные массивы, водоёмы), что применяется, в частности, при спутниковых микроволновых радиометрических измерениях.

При наземных микроволновых радиометрических измерениях известен способ калибровки СВЧ-радиометрических систем по радиотепловому излучению безоблачной атмосферы. В этом случае формируются два выходных сигнала при приёме радиотеплового излучения с двух направлений при зенитных углах высоты антенны от 90° до 30° [7, 17]. Данный способ позволяет проводить оперативную калибровку в текущих условиях, что важно для мобильных систем. Однако работа таких систем в условиях изменяющегося фонового излучения (например, при изменении состояния подстилающей поверхности, происходящей при смене сезона или выпадении осадков, наличии или отсутствии облаков и зон осадков в угловой области рассеяния диаграммы направленности антенны) определяет необходимость компенсации влияния фоновых шумов как на результаты текущих измерений, так и на точность калибровки системы, а уменьшение размеров апертуры антенны в мобильных микроволновых радиометрических системах с ограничением на её массогабаритные характеристики приводит к снижению направленных свойств антенны и росту вклада фоновых шумов в выходной сигнал системы.

Выходной сигнал СВЧ-радиометрической системы с компенсацией фоновых шумов. Одним из способов снижения влияния фоновых шумов на результаты

СВЧ-радиометрических измерений является осуществление разностных измерений при формировании в системе сигнала компенсации, пропорционального составляющей входного сигнала. Этот сигнал обусловлен приёмом фоновых шумов из области рассеяния диаграммы направленности антенны [18]. Один из вариантов реализации данного способа – получение дополнительного сигнала компенсации на выходе антенны. При этом в антенне происходит раздельный приём на двух модах круглого волновода: основного сигнала на моде H_{11} и дополнительного сигнала компенсации на моде E_{01} [18, 19].

На рис. 1 показана схема формирования выходных сигналов двухмодовой двухканальной антенны с формированием дополнительного сигнала компенсации. Сигнал, принимаемый коническим рупором 1, поступает в круглый волновод 4, в котором возбуждаются две моды – H_{11} и E_{01} . В трансформаторе типов волн $H_{11} \rightarrow H_{10}$, представляющим собой соединение круглого волновода с прямоугольным волноводом, широкая стенка которого параллельна оси круглого волновода, отводится энергия. Эта энергия, переносимая только модой H_{11} , и подаётся на выход плеча 2. При этом она обеспечивает формирование выходного сигнала основного антенного канала СВЧ-радиометрической системы. Режекторный фильтр 3 в виде проводящего кольца препятствует прохождению моды H_{11} и пропускает на вход трансформатора $E_{01} \rightarrow H_{10}$ (соединение круглого и прямоугольного волновода, широкая стенка которого перпендикулярна оси круглого волновода) только энергию, переносимую модой E_{01} , которая проходит на выход плеча 5, образуя выходной сигнал дополнительного антенного канала.

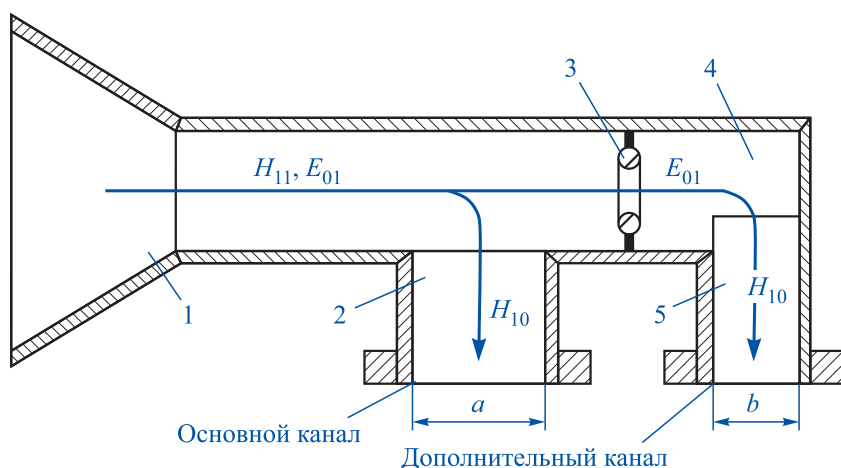


Рис. 1. Схема формирования выходных сигналов двухканальной двухмодовой антенны: 1 – рупорная антенна; 2 – прямоугольный волновод основного антенного канала; 3 – режекторный модовый фильтр; 4 – круглый волновод; 5 – прямоугольный волновод дополнительного антенного канала

Fig. 1. Output signal generation scheme two-channel dual-mode antenna: 1 – horn antenna; 2 – rectangular waveguide of the main antenna channel; 3 – cutting mode filter; 4 – round waveguide; 5 – rectangular waveguide of the additional antenna channel

На рис. 2 представлена диаграмма направленности антенны с апертурой радиусом 350 мм на частоте 9,375 ГГц. Противоположность распределения поля по апертуре антенны на моде E_{01} приводит к отсутствию приёма вдоль оси антенны и выделению в разностном сигнале системы составляющей, обусловленной приёмом радиотепловой мощности из области главного лепестка диаграммы направленности основного канала антенны.

Приём радиотеплового излучения на общую апертуру двухканальной двухмодовой антенны СВЧ-радиометрической системы приводит к делению общей входной мощности на две части: полей моды H_{11} и моды E_{01} в волноводе общего антенно-волноводного тракта антенны. Кроме того, деление мод по выходным каналам (см. рис. 1) и их раздельное преобразование в основные моды прямоугольного волновода H_{10} для основного и дополнительного антенных каналов выполняется в общем случае с разными коэффициентами передачи. С учётом указанных особенностей формирования выходных сигналов

в двухканальной двухмодовой антенне выходной сигнал СВЧ-радиометрической системы с компенсацией фоновых шумов запишем как

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{осн}} - U_{\text{доп}} = k(1-\gamma)\eta T_{\text{я.гл}}[(1-\beta_{\text{осн}})(1-K_M)K_{\text{осн}} - (1-\beta_{\text{доп}})K_M K_{\text{доп}}] + \eta(1-\gamma)T_{\text{ф}}[\beta_{\text{осн}}(1-K_M)K_{\text{осн}} - \beta_{\text{доп}}K_M K_{\text{доп}}] + \Delta T_{\text{ш.пр}}, \quad (6)$$

где $U_{\text{осн}}$, $U_{\text{доп}}$ – выходные сигналы СВЧ-радиометрической системы при приёме по основному и дополнительному антенным каналам радиотепловой мощности; $\beta_{\text{осн}}$, $\beta_{\text{доп}}$ – коэффициенты рассеяния антенны с приёмом по основному и дополнительному каналам; $K_M = P_{E_{01}}/P_{H_{11}}$ – коэффициент, определяющий соотношение мощностей полей мод E_{01} , H_{11} ; $K_{\text{осн}}$, $K_{\text{доп}}$ – коэффициенты передачи мод круглого волновода в моды H_{10} прямоугольного волновода; $\Delta T_{\text{ш.пр}}$ – разностный вклад в выходной сигнал системы шумовой температуры её приёмника.

Для обеспечения режима полной компенсации влияния фоновых шумов на результаты СВЧ-радиометрических измерений должно выполняться требование

$$\beta_{\text{осн}}(1-K_M)K_{\text{осн}} - \beta_{\text{доп}}K_M K_{\text{доп}} = 0. \quad (7)$$

Анализ выражения (6) показывает, что структура выходного сигнала СВЧ-радиометрической системы с компенсацией фоновых шумов остаётся аналогичной выражению (5). Следовательно, порядок и принципы калибровки по внешним «детерминированным» источникам радиотеплового излучения остаются прежними, но для калибровки системы в качестве выходного сигнала должен быть принят разностный сигнал системы $U_{\text{осн}} - U_{\text{доп}}$, сформированный на выходе общего приёмника двухканальной СВЧ-радиометрической системы с компенсацией фоновых шумов.

Условия реализации внешней калибровки трёхдиапазонной СВЧ-радиометрической системы с компенсацией фоновых шумов. Для расширения возможностей оценки метеопараметров атмосферы по данным результатов измерений СВЧ-радиометрической системой переходят к многочастотному режиму работы с приёмом радиотеплового излучения в нескольких частотных диапазонах. Так, для решения задачи обнаружения и прогнозирования развития опасных атмосферных явлений разработана СВЧ-радиометрическая система, обеспечивающая приём радиотеплового излучения атмосферы на общую апертуру антенны в трёх существенно различных частотных диапазонах: 1,35;

3,2 и 7,5 см [20, 21]. Для уменьшения влияния условий проведения исследований и неоднородностей окружающего пространства на результаты измерений предусмотрен двухканальный приём в каждом частотном диапазоне и последовательное выделение в антенно-фидерном тракте антенны сигналов основного и дополнительного каналов каждого рабочего диапазона системы.

Во всех частотных диапазонах одновременно формируются выходные разностные сигналы, состав которых соответствует выражению (6). Приём сигнала с одного направления в трёх частотных диапазонах исключает влияние на результаты измерений пространственно-угловых вариаций радиотеплового излучения. Это позволяет применять одни и те же источники радиотеплового излучения, обеспечивающие два детерминированных уровня радиояркостной температуры $T_{\text{я.гл}}$, для внешней калибровки многочастотной СВЧ-радиометрической системы во всех диапазонах. Угловые размеры таких источников должны соответствовать угловой области главного лепестка диаграммы направленности антенны для самого длинноволнового диапазона. В данном случае для трёхдиапазонной СВЧ-радиометрической системы с компенсацией фоновых шумов это требование относится к диапазону с центральной длиной волны 7,5 см.

Для рассматриваемой трёхдиапазонной СВЧ-радиометрической системы авторы оценили близость к нулю выражения (7) в зависимости от соотношения длины волны и радиуса апертуры антенны. При равных коэффициентах $K_{\text{осн}}$, $K_{\text{доп}}$ для основного и дополнительного каналов определили разностный параметр Δ , от которого зависит погрешность отсчёта радиояркостных температур после

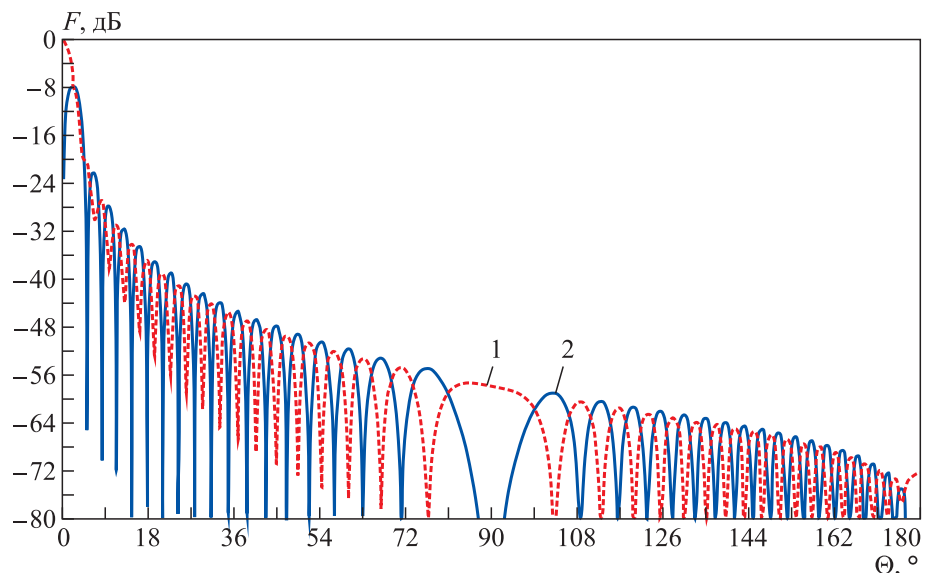


Рис. 2. Диаграмма направленности антенны с апертурой радиусом 350 мм на частоте 9,375 ГГц: 1, 2 – основной и дополнительный каналы соответственно

Fig. 2. Antenna pattern with an aperture radius of 350 mm at a frequency of 9,375 GHz: 1, 2 – main and additional channels

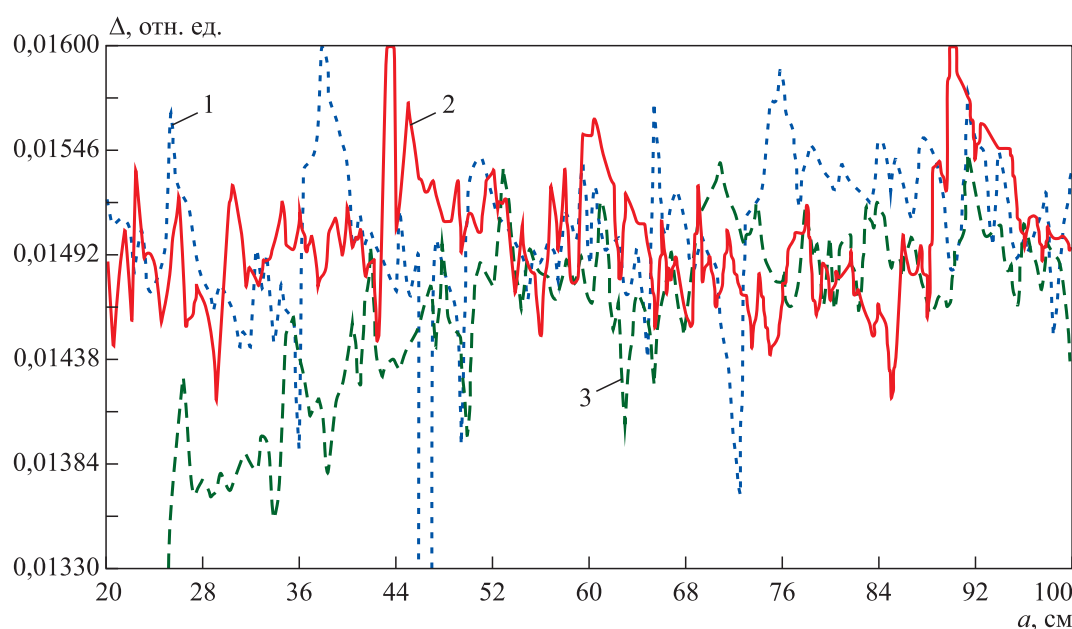


Рис. 3. Зависимость разностного параметра Δ от радиуса a апертуры антенны трёхдиапазонной СВЧ-радиометрической системы с компенсацией фоновых шумов:
1–3 – 1,35; 3,2; 7,5 см соответственно

Fig. 3. Dependence of the difference parameter Δ on the aperture radius a of the antenna of a three-band microwave radiometric system with background noise compensation:
1 – 1,35 cm; 2 – 3,2 cm; 3 – 7,5 cm

калибровки СВЧ-радиометрической системы в условиях изменяющихся вкладов фоновых излучений при формировании двух отсчётных уровней при внешней калибровке:

$$\Delta = \beta_{\text{осн}}(1 - K_{\text{м}}) - \beta_{\text{доп}} K_{\text{м}}$$

Результаты вычисления параметра Δ для трёх длин волн и значений радиуса апертуры антенны в диапазоне 20–100 см представлены на рис. 3. Изрезанность графиков объясняется существенной зависимостью соотношения и формы диаграммы направленности основного и дополнительного каналов СВЧ-радиометрической системы от относительного размера апертуры при единообразном подходе к аналитическому выделению угловой области формирования полезного сигнала и позволяет оценить порядок разностного параметра Δ для трёх частотных каналов рассматриваемой системы.

Разностный параметр Δ задаёт погрешность определения начального отсчёта шкалы радиометра в значениях радиоярких температур. Численно оценить такую погрешность можно при условии задания радиояркой температуры фонового излучения $T_{\text{ф}}$. На основании известных из работы [22] данных об излучательных свойствах земной поверхности в микроволновом диапазоне можно задать предельную радиояркую температуру существенно различающихся видов подстилающей поверхности на длине волны 1,35 см. Например, при температуре окружающей среды 20 °С предельная радиояркая температура

для суши составит 270 К, а для водной поверхности – 100 К. Тогда погрешность определения калиброванного уровня начала отсчёта U_0 шкалы радиометра в выражении (5), обусловленная влиянием фонового излучения, будет не более 4 К для суши и 1,5 К для водной поверхности.

Анализ полученных результатов расчёта разностного параметра показал, что вклад фоновых шумов в выходном разностном сигнале СВЧ-радиометрической системы во всех трёх частотных диапазонах не превышает единиц процентов от значения $T_{\text{ф}}$ независимо от размеров апертуры антенны, что важно для создания мобильных систем с ограничением на размеры антенны. Калибровка по внешним источникам

радиотеплового излучения такой системы должна обеспечить хорошее соответствие выходного разностного сигнала радиояркой температуре исследуемой области независимо от условий проведения измерений.

Заключение. Проведённый анализ условий калибровки СВЧ-радиометрической системы по внешним «детерминированным» источникам радиотеплового сигнала показал существование влияния изменения вклада фоновых шумов при формировании двух отсчётных уровней радиояркой температуры при смене углового направления. Из анализа состава выходного сигнала СВЧ-радиометрической системы следует, что это изменение проявляется в недетерминированном приросте выходного сигнала, что влечёт возникновение погрешности определения калиброванного начала отсчёта шкалы приёмника системы. Такое влияние наиболее существенно при выполнении калибровки мобильных СВЧ-радиометрических систем с относительно низкой направленностью антенной системы и возможным существенным изменением уровня фоновых шумов.

Полученные численные результаты оценки влияния погрешности компенсации фоновых шумов в трёхдиапазонной СВЧ-радиометрической системе показали, что реализация двухканального приёма с формированием дополнительного сигнала компенсации и выполнением разностного приёма обеспечивает снижение вклада фоновых шумов в выходной сигнал системы и позволяет уменьшить погрешность внешней калибровки системы, выполняемой по разностному выходному сигналу.

Список литературы

1. Некос А. Н., Некос В. Е., Шукин Г. Г. Дистанционные методы исследований природных объектов. СПб.: РГГМУ, 2009. 318 с.
2. Ware R., Carpenter R., Guldner J., Liljegren J., Nehrkorn T., Solheim F., and Vandenberghe F., *Radio Science*, 2003, vol. 38, no. 4, pp. 8079–8032. DOI: 10.1029/2002RS002856
3. Караваев Д. М., Шукин Г. Г. Микроволновое радиометрическое зондирование системы «атмосфера – подстилающая поверхность». Вопросы радиометеорологии. СПб.: ВКА им. А. Ф. Можайского, ООО «Издательство «Балтийская печать», 2013. С. 173–192.
4. Rose T., Crewell S., Lohnert U., and Simmer C., *Atmospheric Research*, 2005, vol. 75, no. 3, pp. 183–200. DOI:10.1016/j.atmosres.2004.12.005
5. Battaglia A., Saavedra P., Simmer C., and Rose T. Rain, *IEEE Geoscience and remote sensing letters*, 2009, vol. 6, no. 2, pp. 354–358. DOI: 10.1109/LGRS.2009.2013484
6. Westwater Ed. R., Crewell S., Mätzler C., *Radio Science*, 2004, no. 77, pp. 59–80. DOI: 10.23919/URSIRSB.2004.7909438
7. Hewison T. J., *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, no. 45, pp. 2163–2168. DOI:10.1109/TGRS.2007.898091
8. Marzano F. S., Cimini D., Ciotti P., Ware R., *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2005, vol. 43, no. 5, pp. 1000–1011. DOI: 10.1109/TGRS.2004.839595
9. Фалин В. В. Радиометрические системы СВЧ. М.: Луч, 1997. 440 с.
10. Han Y., and Westwater Ed. R., *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2000, no. 38, pp. 1260–1276. DOI: 10.1109/36.843018
11. Mashwitz G., Lohnert U., Crewell S., Rose T., and Turner D. D., *Atmospheric Measurement Techniques*, 2013, no. 6, pp. 2641–2658. DOI: 10.5194/atm-6-2641-2013
12. Cadeddu M. P., Liljegren J. C., and Turner D. D., *Atmospheric Measurement Techniques*, 2013, no. 6, pp. 2359–2372. DOI: 10.5194/amt-6-2359-2013
13. Matzler C., *Thermal Microwave Radiation: Applications for Remote Sensing*, London, The Institution of Engineering and Technology, 2006, 583 p.
14. Miacci M., Angelis C. F., *Journal of Aerospace Technology & Management*, 2018, vol. 10, 12 p. DOI: 10.5028/jatm.v10.927
15. Конникова В. К., Лехт Е. Е., Силантьев Н. А. Практическая радиоастрономия: Учебное пособие. М.: Издательство Московского университета, 2011. 304 с.
16. Федосеева Е. В., Шукин Г. Г. Вопросы метрологического обеспечения радиотеплолокационных измерений в условиях действия внешних шумовых помех: монография. Муром: Издательско-полиграфический центр Муромского института ВлГУ, 2012. 103 с.
17. Кабанов В. А. Радиометр для метеорологических измерений с точной калибровкой по яркостной температуре неба // Радиофизика и электроника. 2016. Т. 7 (21). № 3. С. 11–17.

18. Федосеева Е. В., Ростокин И. Н. Радиометрическая система с дополнительным каналом формирования сигнала компенсации // Труды ГГО. 2010. Вып. 562. С. 243–257.
19. Федосеева Е. В. Оценка погрешности измерений радиояркостной температуры в радиотеплолокационных системах контроля метеопараметров с компенсацией фоновых шумов // Метрология. 2014. № 11. С. 33–42.
20. Ростокин И. Н., Федосеева Е. В. Вопросы построения многочастотной радиометрической системы дистанционного зондирования облачной атмосферы с компенсацией фонового излучения // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2015. № 1 (17). С. 12–15.
21. 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 Open Conference on Radio Wave Propagation (RWP), Kazan, Russia, 1–6 July, 2019. DOI: 10.1109/RWP.2019.8810166
22. Шумко А. М. СВЧ-радиометрия водной поверхности и почвогрунтов. М.: Наука, 1986. 190 с.

References

1. Nekos A. N., Nekos V. E., Shchukin G. G., *Distantionnye metody issledovaniy prirodnikh ob"ektov*, Saint Petersburg, RGGMU Publ., 2009, 318 p. (in Russian).
2. Ware R., Carpenter R., Guldner J., Liljegren J., Nehrkorn T., Solheim F., and Vandenberghe F., *Radio Science*, 2003, vol. 38, no. 4, pp. 8079–8032. DOI: 10.1029/2002RS002856
3. Karavaev D. M., Shchukin G. G., *Mikrovolnovoe radiometricheskoe zondirovanie sistemy "atmosfera – podstilayushchaya poverkhnost"*. *Voprosy radiometeorologii*, Saint Petersburg, VKA imeni A. F. Mozhaiskogo, ООО "Izdatel'stvo "Baltiiskaya pechat'" Publ., 2013, pp. 173–192 (in Russian).
4. Rose T., Crewell S., Lohnert U., and Simmer C., *Atmospheric Research*, 2005, vol. 75, no. 3, pp. 183–200. DOI:10.1016/j.atmosres.2004.12.005
5. Battaglia A., Saavedra P., Simmer C., and Rose T. Rain, *IEEE Geoscience and remote sensing letters*, 2009, vol. 6, no. 2, pp. 354–358. DOI: 10.1109/LGRS.2009.2013484
6. Westwater Ed. R., Crewell S., Mätzler C., *Radio Science*, 2004, no. 77, pp. 59–80. DOI: 10.23919/URSIRSB.2004.7909438
7. Hewison T. J., *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, no. 45, pp. 2163–2168. DOI:10.1109/TGRS.2007.898091
8. Marzano F. S., Cimini D., Ciotti P., Ware R., *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2005, vol. 43, no. 5, pp. 1000–1011. DOI: 10.1109/TGRS.2004.839595
9. Falin V. V., *Radiometricheskie sistemy SVCh*, Moscow, Luch Publ., 1997, 440 p. (in Russian).
10. Han Y., and Westwater Ed. R., *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2000, no. 38, pp. 1260–1276. DOI: 10.1109/36.843018
11. Mashwitz G., Lohnert U., Crewell S., Rose T., and Turner D. D., *Atmospheric Measurement Techniques*, 2013, no. 6, pp. 2641–2658. DOI: 10.5194/atm-6-2641-2013

12. Cadeddu M. P., Liljegren J. C., and Turner D. D., *Atmospheric Measurement Techniques*, 2013, no. 6, pp. 2359–2372. DOI:10.5194/amt-6-2359-2013

13. Matzler C., *Thermal Microwave Radiation: Applications for Remote Sensing*, London, The Institution of Engineering and Technology, 2006, 583 p.

14. Miacci M., Angelis C. F., *Journal of Aerospace Technology & Management*, 2018, vol. 10, 12 p. DOI: 10.5028/jatm.v10.927

15. Konnikova V. K., Lekht E. E., Silant'ev N. A., *Practical radio astronomy. Textbook*, Moscow University Publ., 2011, 304 p. (in Russian).

16. Fedoseeva E. V., Shchukin G. G., *Voprosy metrologicheskogo obespecheniya radioteplolokatsionnykh izmerenii v usloviyakh deistviya vneshnikh shumovykh pomekh: monografiya*, Murom, Izdatel'sko-poligraficheskii tsentr Muromskogo instituta VLGU Publ., 2012, 103 p. (in Russian).

17. Kabanov V. A., *Radiofizika i elektronika*, 2016, vol. 7 (21), no. 3, pp. 11–17 (in Russian).

18. Fedoseeva E. V., Rostokin I. N., *Proceedings of MGO*, 2010, vol. 562, pp. 243–257 (in Russian).

19. Fedoseeva E. V., *Measurement Techniques*, 2015, vol. 57, no. 12, pp. 1463–1468. DOI: 10.1007/s11018-015-0650-1

20. Rostokin I. N., Fedoseeva E. V., *Radio and telecommunication systems*, 2015, no. 1 (17), pp. 12–15 (in Russian).

21. Rostokin I., Fedoseeva E., Rostokina E., Shchukin G., *2019 Russian Open Conference on Radio Wave Propagation (RWP)*, Proceedings of the Conference, Kazan, Russia, 1–6 July 2019. DOI: 10.1109/RWP.2019.8810166

22. Shutko A. M., *SVCh-radiometriya vodnoj poverkhnosti i pochvogruntov*, Moscow, Nauka Publ., 1986, 190 p. (in Russian).

Дата поступления: 09.10.2019.

Дата принятия: 24.12.2019.

Calibration issues for a three-band microwave radiometric system with background noise compensation

Elena V. Fedoseeva¹, Georgy G. Shchukin², Ilya N. Rostokin¹

¹Murom Institute (branch) of VPO "Vladimir state University named after Alexander Grigoryevich and Nikolay Grigoryevich Stoletov", Murom, Vladimir region, Russian Federation, e-mail: elenafedoseeva@yandex.ru, rostokin.ilya@yandex.ru

²Military space Academy named after A. F. Mozhaysky, Saint Petersburg, Russian Federation, e-mail: ggshchukin@mail.ru

For microwave radiometric remote sensing systems in natural environments, the important issue is calibration, i.e. determination-one correspondence of values of the output signal value of the brightness temperature of the sensed region, the largest of which evaluated physical parameters. Microwave radiometric systems operate under the influence of external interference, for example, background noise – radiothermal radiation of the space surrounding the system, received through the scattering region of the antenna pattern. This article examines the influence of background noise on the external calibration of a microwave radiometric system (based on an external "deterministic" noise source) and analyzes the conditions for performing such calibration in a system with compensation for the influence of background noise. The analysis of the output signal of the microwave radiometric system showed a significant influence of background noise on the parameter determined during calibration of the system – the beginning of the receiver scale, due to a change in the value of the contribution of background noise to the output signal when forming two reference levels during calibration from two angular directions. The possibility of reducing the interference effect of background noise on the results of measurements in a microwave radiometric system with a special two-channel antenna operating on two modes of a circular waveguide, with the formation of an additional compensation signal at the antenna output, is shown. The proposed version of the analytical evaluation of the degree of compensation of the influence of background noise on the output differential signal of the system and presents results of its application to numerical analysis of error in external calibration a tri-band microwave radiometric system with compensation of background noise when receiving thermal radiation on the total aperture of the antenna.

Key words: microwave radiometric system, calibration for a radio thermal radiation of the atmosphere, brightness temperature, compensation of background noise.