

Метрологические вопросы СВЧ радиометрических измерений в условиях действия внешних помех

Е.В.Федосеева¹, Г.Г.Щукин²

¹Муромский институт (филиал) ФГБОУ ВПО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», 602264, г. Муром, Владимирской обл., ул. Орловская, д. 23, e-mail: elenafedoseeva

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

Рассмотрены основные характеристики метрологического обеспечения СВЧ радиометрических измерений в условиях действия внешних шумовых помех – приема радиотеплового фонового излучения и образования слоя осадков на поверхности антенны при проведении измерений в сложных метеорологических условиях. Приводятся аналитические соотношения оценки погрешностей измерений в основных методах радиометрического зондирования природных сред.

The basic characteristics of metrological assurance for microwave radiometric measurements in conditions of external noise interference – receiving radiological background radiation and the formation of precipitation layer on the surface of the antenna during the measurements in adverse weather conditions. The paper presents analytical evaluation of the ratio of measurement errors in basic methods of radiometric sensing of natural environments.

Введение

Дистанционные измерения параметров окружающего пространства радиометрическими системами являются эффективным способом получения информации о физическом состоянии зондируемых объектов. Роль таких измерений особенно значима в условиях, где прямые измерения либо невозможны, либо погрешность прямых измерений очень велика. Возможность оперативного получения информации о физическом состоянии объектов, находящихся на значительном удалении, делает незаменимым этот вид измерения в дистанционном зондировании, например, при решении задач зондирования атмосферы или поверхности Земли [1–9].

Отличительные особенности радиометрических измерений – малая мощность входного сигнала и его шумовой характер определяют специальные подходы к решению вопросов метрологического обеспечения данного вида измерений. В частности при планировании и организации технического обеспечения радиометрических измерений должны быть решены следующие вопросы:

- осуществление пространственной селекции принимаемого радиотеплового излучения от исследуемой области пространства;
- выделение прироста выходного сигнала, обусловленного приемом внешнего шумового сигнала, на фоне относительного большого по мощности внутреннего шума приемника радиометрической системы;
- определение соответствия уровня выходного сигнала системы радиояркостной температуре исследуемой области с последующим решением обратных задач оценки электрофизических параметров области зондирования.

Антенная температура радиометрической системы в условиях действия внешних помех

В соответствии с уравнением антенного сглаживания антенная температура СВЧ радиометрической системы равна [2, 3, 9]

$$T_a = \eta_a (1 - \beta) T_{я.эл} + \eta_a \beta T_{я.бок} + (1 - \eta_a) T_0, \quad (1)$$

$$\beta = \frac{\iint_{\Omega_{\text{расс}}} F(\Omega) d\Omega}{\iint_{4\pi} F(\Omega) d\Omega},$$

где β – коэффициент рассеяния антенны;

η_a – КПД антенны;

T_0 – термодинамическая температура антенны;

$T_{я.гл.}, T_{я.бок}$ – среднее значение радиояркой температуры среды в области главного лепестка и в области рассеяния ДН, соответственно;

$\Omega_{\text{расс}}$ – угловой размер области рассеяния диаграммы направленности (ДН) антенны: $\Omega_{\text{расс}} = 4\pi - \Omega_{\text{гл}}$.

При условии неизменности параметров приемной антенны, первое слагаемое $T_{\text{инф.а}} = \eta_a(1 - \beta)T_{я.гл}$, характеризующее радиояркую температуру исследуемой области пространства в пределах главного лепестка ДН антенны, может быть принято характеристикой уровня информационной составляющей в составе общего входного сигнала системы. Второе и третье слагаемые $T_{\text{помех.а}} = \eta_a\beta T_{я.бок} + (1 - \eta_a)T_0$, обусловленные через боковые и задние лепестки ДН антенны, и температурными параметрами самой антенны, могут рассматриваться как характеристики уровня помеховой составляющей входного сигнала СВЧ радиометрической системы.

При принятии модели горизонтально – однородной атмосферы и предположения об однородности излучательных свойств подстилающей поверхности аддитивная помеха, вызванная ее радиотепловым излучением, может быть оценена на основе известных соотношений.

Радиояркая температура атмосферы в соответствии с [1]

$$T_{я.атм} = 4(T_0 - 32)(\chi_{\text{к}}I_{\text{к}}^{\circ} + \chi_{\text{в}}H_2) + \bar{T}_p, \quad (2)$$

где $\chi_{\text{к}}$ и $\chi_{\text{в}}$ – коэффициенты поглощения кислорода и водяного пара у поверхности Земли;

$I_{\text{к}}^{\circ} = 5,3 \text{ км}$ и $H_2 = 2,1 \text{ км}$ – эффективные пути поглощения кислорода и водяного пара.

Радиотепловое излучение Земли характеризуется величиной радиояркой температуры, определяемой по выражению [1],

$$T_{я.пн} = T_0 \cdot J_{v,h}, \quad (3)$$

где $J_{v,h}$ – коэффициенты излучательной способности подстилающей поверхности на вертикальной и горизонтальной поляризациях [2].

Аддитивная помеха в радиометрических измерениях радиояркой температуры зондируемой области пространства, например, атмосферы с поверхности Земли может быть представлена в виде

$$\Delta T_{\text{помех}} = \Delta T_{\text{атм}} + \Delta T_{\text{пн}} = \beta_{\text{в}} \cdot \eta_a \cdot T_{я.атм} + \beta_{\text{н}} \cdot \eta_a \cdot T_{я.пн}, \quad (4)$$

где $\Delta T_{\text{атм}}$ и $\Delta T_{\text{пн}}$ – аддитивные помеховые составляющие антенной температуры, обусловленные фоновым излучением атмосферы и подстилающей поверхности соответственно;

$\beta_{\text{в}}, \beta_{\text{н}}$ – коэффициенты рассеяния антенны в верхнем и нижнем полупространстве.

Результат выражения (4) представляет собой оценку средней величины помехи, определяющей в данном случае систематическую погрешность измерения. Любые случайные отклонения от принятых моделей излучения (2) – (3), например, наличие разно-

родных природных сред в верхнем и нижнем полупространствах, вносят дополнительную погрешность.

Если в области рассеивания ДН антенны на фоне однородного с точки зрения излучательных свойств пространства присутствуют объекты космического или атмосферного происхождения, радиояркая температура которых T_{ucm} значительно превышает радиояркую температуру окружающей области, в составе антенной температуры появится дополнительная аддитивная помеха, величина которой зависит от углового размера этих источников Ω_{ucm} . При условии изотропности функции направленности в области рассеяния ДН антенны ее величина равна

$$\Delta T_a = T_{ucm} \beta \Omega_{ucm} / \Omega_{pac} . \quad (5)$$

При наземном базировании СВЧ радиометрической аппаратуры помеховая составляющая антенной температуры также зависит от состояния подстилающей поверхности. Например, при неизменном месторасположении аппаратуры возможно изменение излучательных свойств подстилающей поверхности при выпадении осадков. В [8] приведены результаты оценки изменения радиояркой температуры земной поверхности – почвы при изменении ее влажности от 0 до 12%. Общее отрицательное приращение радиояркой температуры на горизонтальной поляризации равно $60K$, а на вертикальной поляризации – $20K$. При выпадении твердых осадков в виде снега наблюдается сложная интерференционная зависимость радиояркой температуры на начальном этапе формирования снежного покрова с последующим общим снижением радиояркой температуры подстилающей поверхности более чем в два раза по сравнению с радиояркой температурой почвы.

Сильным помехообразующим фактором в работе радиотеплолокационных систем в условиях выпадения осадков является формирование их слоя на поверхности зеркала антенны, который с одной стороны определяет приращение антенной температуры за счет собственного излучения слоя осадков, с другой стороны уменьшает КПД антенны за счет изменения отражательных свойств поверхности зеркала [2, 8, 9]. Антенная температура СВЧ радиометрической системы при наличии слоя осадков на зеркале антенны равна

$$T'_a = T_a \cdot R_{321}^2 + T_{321} , \quad (6)$$

где R_{321}^2 – коэффициент отражения по мощности от трехслойного образования (воздух – вода – металл антенны);

T_{321} – температура шумов данного образования, приведенная ко входу приемника.

Согласно (6) собственное излучение слоя осадков на зеркале создает аддитивную помеху, а изменение отражательных свойств его поверхности, характеризуемое коэффициентом отражения R_{321}^2 , определяет помеховое действие мультипликативного характера.

В предположении выполнения условия равновесного излучения в трехслойной среде металл-слой осадков-воздух ее коэффициент излучения равен коэффициенту поглощения, а помеховое приращение антенной температуры может быть определено по формуле

$$\Delta T'_a = (1 - R_{321}^2)(T_0 - T_{я.гл}(1 - \beta)\eta). \quad (7)$$

Анализ помехового прироста антенной температуры в условиях выпадения дождя позволяет сделать вывод о достаточно сложном характере влияния слоя осадков на погрешность радиометрических измерений. При определенных условиях может преобладать или аддитивная, или мультипликативная помеха в зависимости от величины радиояркой температуры зондируемого объекта. Так на рис.1 показаны зависимости

прироста антенной температуры – положительного за счет собственного радиотеплового излучения слоя воды ΔT_{a1} , отрицательного ΔT_{a2} за счет снижения отражательных свойств зеркала антенны и общий помеховый прирост антенной температуры ΔT_a при радиометрическом зондировании атмосферы на частоте 13.6ГГц.

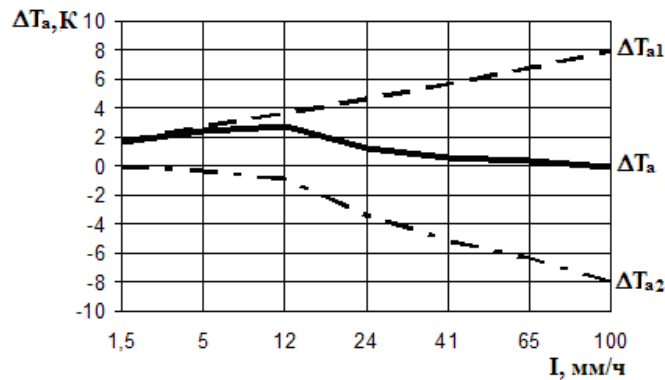


Рис. 1. Приросты антенной температуры СВЧ радиометрической системы в зависимости от интенсивности дождя на частоте 13.6 ГГц

Характеристики СВЧ радиометрических систем с учетом влияния фонового шума

Наличие помеховой составляющей $T_{помех.a}$ в антенной температуре радиометрической системы приводит к снижению общего отношения сигнал/шум $q_{сист}$ на ее входе. Для оценки этого влияния можно выделить составляющие, обусловленные отдельно помеховой величиной антенной температуры $T_{помех.a}$ и шумами приемника $T_{шпр}$.

$$q_{сист} = \frac{T_{инф.a}}{T_{шпр} + T_{помех.a}} = \frac{q_{пр} q_a}{q_{пр} + q_a}, \quad (8)$$

где $q_{пр} = T_{инф.a} / T_{шпр}$ – отношение сигнал/шум, определяемое по шумам приемника;

$q_a = T_{инф.a} / T_{помех.a}$ – отношение сигнал/шум, определяемое по помеховой составляющей антенной температуры.

На рис. 2 показана зависимость отношения сигнал/шум системы от величины q_a при условии $q_{пр} = 1$.

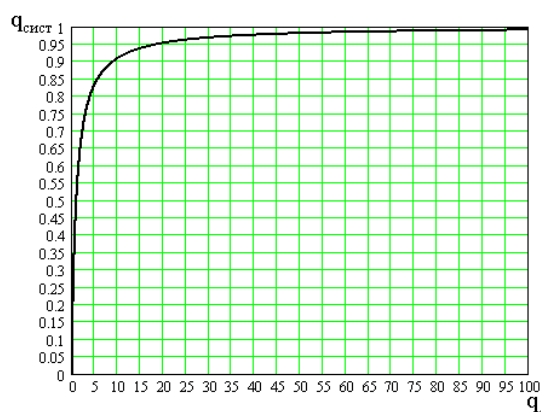


Рис. 2. Зависимость отношения сигнал/шум радиометрической системы от величины q_a при условии $q_{пр} = 1$

Если принять допустимым уменьшение значения отношения сигнал/шум на 10%, то существенное влияние на общее отношение сигнал/шум радиометрической системы имеют величины q_a , численное значение которых находится в пределах от 0 до 10, что наблюдается в условиях существенных фоновых излучений и слабых направленных свойств антенны.

Чувствительность радиометрической системы в общем случае определяется выражением [1–4]

$$\Delta T = \mu T_{\text{шс}} / \sqrt{\Delta f \tau}, \quad (10)$$

где μ - коэффициент, зависящий от схемного построения радиометра;

$T_{\text{шс}} = T_{\text{шпр}} + T_{\text{инф.а}} + T_{\text{помех.а}}$ - шумовая температура радиометрической системы, равная сумме шумовой температуры приемника и антенной температуры;

Δf и τ – ширина полосы рабочих частот и времени накопления выходного сигнала СВЧ радиометрической системы.

Для анализа влияния помеховых составляющих антенной температуры $T_{\text{помех.а}}$ на снижение чувствительности СВЧ радиометрической системы относительно ее потенциальной чувствительности δT_0 ($\delta T_0 = T_{\text{шпр}} / \sqrt{\Delta f \tau}$) в выражении (10) следует выделить составляющие, характеризующие данное влияние,

$$\delta T = \mu \cdot \delta T_0 \left(1 + \frac{T_{\text{инф.а}}}{T_{\text{шпр}}} + \frac{T_{\text{помех.а}}}{T_{\text{шпр}}} \right). \quad (11)$$

С учетом введенных ранее величин q_a и $q_{\text{пр}}$ чувствительность радиометрической системы равна

$$\delta T = \mu \cdot \delta T_0 (1 + q_{\text{пр}} (1 + 1/q_a)). \quad (12)$$

В выражении (12) множитель

$$\Delta q = 1 + q_{\text{пр}} (1 + 1/q_a) \quad (13)$$

характеризует влияние помеховых составляющих антенной температуры ($1/q_a = T_{\text{помех.а}}/T_{\text{инф.а}}$) и шумовой температуры приемника на чувствительность СВЧ радиометрической системы. Поэтому Δq можно рассматривать как относительный коэффициент снижения чувствительности СВЧ радиометрической системы.

Результаты численной оценки величины Δq по (13) приведены на рис. 3.

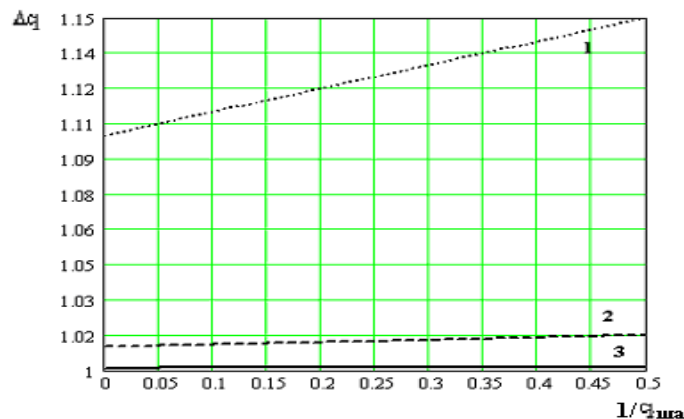


Рис. 3. Зависимость относительного коэффициента снижения чувствительности СВЧ радиометрической системы при наличии помеховых составляющих антенной температуры (1 - $q_{\text{пр}} = 0.1$; 2 - $q_{\text{пр}} = 0.01$; 3 - $q_{\text{пр}} = 0.001$)

Анализ выражения (13) и данных рис. 3 показывает, что относительное снижение общей чувствительности системы, характеризуемое увеличением Δq , обусловленное влиянием фонового шума (задаваемое величиной $1/q_a$), наиболее заметно при зондировании высокотемпературных объектов СВЧ радиометрическими системами с малыми собственными шумами, когда q_{np} имеет значение 0,1 и более.

Потенциальная угловая разрешающая способность радиометрической системы при отсутствии фонового шума оценивается в первом приближении шириной главного лепестка ДН антенны. Наличие в составе антенной температуры составляющей, обусловленной фоновым шумом, приводит к снижению угловой разрешающей способности. Проведенная оценка показала, что при радиояркой температуре фонового излучения, в два раза превышающей радиояркую температуру исследуемой области, угловая разрешающая способность снижается на 20%.

Погрешности измерений радиояркой температуры атмосферы радиометрическими методами

В зависимости от метеоусловий и задач измерений выделяют следующие методы радиометрических измерений атмосферы: абсолютный (при зондировании «чистой» атмосферы или сплошной облачности), относительный (при исследовании локальных облачных образований и измерении их радиояркого контраста) и угловых разрезов (при построении угловых профилей облачности) [1].

Погрешность абсолютных измерений СВЧ радиометрическими системами при выполнении внутренней и внешней калибровки системы, при наличии фонового шума с радиояркой температурой $\bar{T}_\phi = \alpha \bar{T}_{гл}$ определяется выражением [10, 11]

$$\delta_{\bar{T}_{гл}}^2 \approx K_{T_{як}}^2 \delta_{T_{як}}^2 + K_{T_\phi}^2 \delta_{T_\phi}^2 + K_{T_0}^2 \delta_{T_0}^2 + K_\beta^2 \delta_\beta^2 + K_T^2 \delta_T^2, \quad (14)$$

где $\delta_T = \sigma_T / T_{ак}$,

σ_T - чувствительность радиометра;

δ_{T_ϕ} - относительная погрешность измерения радиояркой температуры, обусловленная наличием в антенной температуре составляющей, обусловленной приемом фонового шума, равная $\delta_{T_\phi} = T_\phi / T_{гл}$.

$$K_{T_0} = \frac{T_0}{(1-\beta)\bar{T}_{гл}} \frac{\left(\frac{\bar{T}_{гл}}{T_0} - \frac{T_{як}}{T_0}\right)(1-(1-\alpha)\beta)}{1 - \frac{T_{як}}{T_0}(1-(1-\alpha)\beta)}, \quad K_{T_{як}} = \frac{\frac{T_0}{\bar{T}_{гл}} - (1-(1-\alpha)\beta)}{(1-\beta)\left[\frac{T_0}{T_{як}} - (1-(1-\alpha)\beta)\right]},$$

$$K_{T_\phi} = \frac{\beta}{(1-\beta)}, \quad K_\beta = \frac{\beta(1-\alpha)}{(1-\beta)\eta},$$

$$K_T = \frac{\sqrt{2} \frac{T_0}{\bar{T}_{гл}} \left[\eta(1-(1-\alpha)\beta) + \frac{T_0}{T_{як}}(1-\eta) \right] \left[1 - \frac{\bar{T}_{гл}}{T_0}(1-\eta) \right]}{(1-\beta)T_0 / T_{як}} \times$$

$$\times \left\{ 2 + \frac{\frac{T_0}{T_{як}} \left[\eta(1-(1-\alpha)\beta) + \frac{T_0}{T_{як}}(1-\eta) \right]}{\left(\frac{T_0}{T_{як}} \eta - \eta(1-(1-\alpha)\beta) \right)^2} + \frac{\frac{T_0}{T_{гл}} \left[\eta(1-(1-\alpha)\beta) + \frac{T_0}{T_{гл}}(1-\eta) \right]}{\left(\frac{T_0}{T_{гл}} \eta - \eta(1-(1-\alpha)\beta) \right)^2} \right\}. \quad (15)$$

На рис. 4 приведены зависимости относительной среднеквадратической погрешности и ее составляющих при зондировании высокотемпературных (а)) и низкотемпературных (б)) областей пространства при чувствительности радиометра $\sigma_T = 0.1\text{К}$.

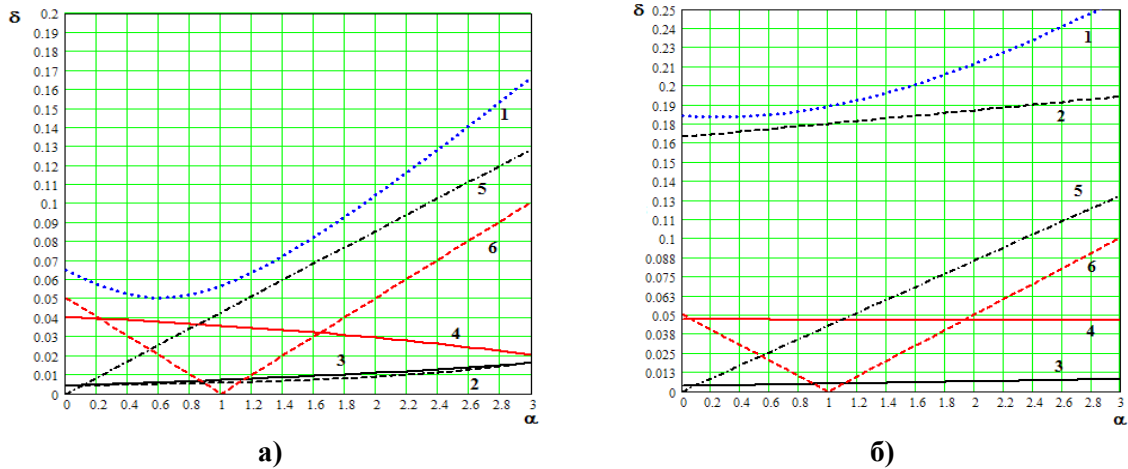


Рис. 4. Зависимость относительной среднеквадратической погрешности измерения радиояростной температуры абсолютным методом от уровня фонового шума, задаваемого коэффициентом α ($\bar{T}_\phi = \alpha \bar{T}_{\text{гл}}$)

$$1 - \delta_{T_{\text{гл}}}; 2 - K_T \delta_T; 3 - K_{T_0} \delta_{T_0}; 4 - K_{T_{\text{ак}}} \delta_{T_{\text{ак}}}; 5 - K_{T_\phi} \delta_{T_\phi}; 6 - K_\beta \delta_\beta$$

Согласно данным рис. 4 при высокой чувствительности радиометра относительный вклад погрешности оценки фонового шума оказывается определяющим общий уровень погрешности радиометрических измерений, возрастая по величине при увеличении коэффициента α . Так в среднем увеличение α на 10 % приводит к возрастанию общей погрешности на 1%.

В относительных измерениях при наличии погрешности компенсации фонового шума ΔT_ϕ прирост антенной температуры для радиояростного контраста $\Delta T_{\text{гл}}$ задается выражением [10, 11]

$$\Delta T_a = \Delta T_{\text{гл}}(1-\beta)\eta + \Delta T_\phi \beta \eta. \quad (16)$$

Тогда для относительной среднеквадратической погрешности измерения радиояростного контраста была предложена формула

$$\delta_{\Delta T_{\text{гл}}}^2 = K_\beta^2 \delta_\beta^2 + K_{\Delta T_\phi}^2 \delta_{\Delta T_\phi}^2 + K_{T_0}^2 \delta_{T_0}^2 + K_{T_{\text{ак}}}^2 \delta_{T_{\text{ак}}}^2 + K_T^2 \delta_T^2, \quad (17)$$

где $\delta_{\Delta T_\phi}$ – относительная погрешность измерения, вызванная неточностью компенсации фонового шума, равная $\delta_{\Delta T_\phi} = \Delta T_\phi / \Delta T_a$;

$$K_\beta = \frac{(\Delta T_a - \Delta T_\phi)\beta}{(1-\beta)\Delta T_a}, K_{\Delta T_\phi} = \frac{\beta}{(1-\beta)}, K_{T_0} = \frac{T_0}{T_0 - T_{\text{ак}}}, K_{T_{\text{ак}}} = \frac{T_{\text{ак}}}{T_0 - T_{\text{ак}}}, \quad (18)$$

$$K_T = T_{\text{ак}} \left[\frac{3}{T_0^2} + \frac{T_{\text{ак}}^2}{T_0^2(T_0 - T_{\text{ак}})^2} + \frac{2}{\Delta T_{\text{гл}}^2(1-\beta)^2\eta^2} + \frac{1}{(T_0 - T_{\text{ак}})^2} \right]^{1/2}.$$

На рис. 5 показаны зависимости среднеквадратической погрешности измерения радиояростного контраста от его абсолютного значения.

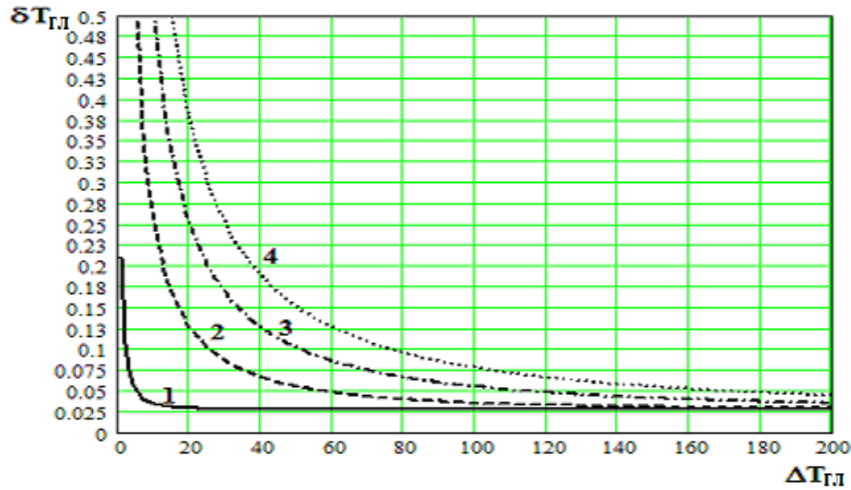


Рис. 5. Зависимость среднеквадратической погрешности измерения радиояркого контраста от его абсолютной величины при погрешности компенсации фонового шума ΔT_{ϕ} 0К (1), 10К (2), 20К (3), 30К (4) ($\sigma_T = 0.1К$)

При наличии погрешности компенсации фонового шума общая погрешность измерения существенно возрастает, особенно при небольших значениях $\Delta T_{\text{гл}}$, так при чувствительности радиометра 1К для радиояркого контраста $\Delta T_{\text{гл}} = 10К$ погрешность измерения при погрешности компенсации фонового шума $\Delta T_{\phi} = 0К$, 10К и 20К равна соответственно 0.21, 0.325, 0.542. а при чувствительности радиометра 0.1К, значения аналогичных погрешностей – 0.034, 0.251, 0.501.

В методе угловых разрезов при оценке метеопараметров по результатам отношений радиоярких температур для двух угловых направлений в случае расположения опорной области в одном полупространстве с исследуемой областью погрешность измерения для каждого углового направления определяется по выражению (16).

При расположении опорной и исследуемой области в разных полупространствах погрешность для оценки прироста антенной температуры из-за разницы фонового шума при направлении на опорную и исследуемую область в первом приближении было введено выражение [9]

$$\Delta T_{\phi} = (\beta_{\text{верх}} - \beta_{\text{ниж}}) (\bar{T}_{\phi}^{\text{в}} - \bar{T}_{\phi}^{\text{н}}) / (1 - \beta) = \Delta\beta \Delta \bar{T}_{\phi\text{вн}} / (1 - \beta), \quad (19)$$

где $\beta_{\text{верх}}$, $\beta_{\text{ниж}}$ – доля общего коэффициента рассеяния антенны, характеризующие прием через область рассеяния ДН антенны из верхнего и нижнего полупространства соответственно; $\Delta\beta = \beta_{\text{верх}} - \beta_{\text{ниж}}$.

Коэффициенты влияния погрешностей измерения коэффициента рассеяния антенны и разности фонового шума равны

$$K_{\beta} = \frac{(\Delta T_{\text{я}} - \Delta\beta \Delta T_{\phi\text{вн}}) \beta}{(1 - \beta) \Delta T_{\text{я}}} \approx \frac{(1 - \Delta\beta) \beta}{(1 - \beta)}, \quad K_{\Delta T_{\phi}} = \frac{\Delta\beta}{(1 - \beta)}. \quad (20)$$

Исследования показали, что с увеличением коэффициента рассеяния β суммарная погрешность измерения уменьшается, что объясняется меньшей абсолютной величиной разности фонового шума для направлений на опорную и исследуемую область. При высокой чувствительности радиометра погрешность измерения практически полностью определяется влиянием разности фонового шума по двум угловым направлениям. Так, при $\Delta\beta / (1 - \beta) = 0.11$ доля погрешности за счет разности фонового шума равна 73%, а при $\Delta\beta / (1 - \beta) = 0.2$ – 80 %.

Заключение

В результате проведенного исследования были получены аналитические зависимости для метрологических характеристик СВЧ радиометрических систем: отношения сигнал/шум, чувствительности, разрешающей способности и погрешности измерения, в которых учтено действие внешних помех – фонового шума и изменения состояния поверхности антенны. Полученные соотношения позволяют анализировать влияние внешних помех на результаты СВЧ радиометрических исследований природных сред в зависимости от условий проведения исследований.

Полученные результаты показали: чем выше чувствительность радиометров, тем сильнее влияние внешних помех на метрологические характеристики СВЧ радиометрических систем. Поэтому оценка этого влияния и разработка способов его исключения перспективное направление совершенствования техники СВЧ радиометрических исследований природных сред.

Работа выполнена при поддержке РФФИ гранта №14-02-97510 р_центр_а.

Литература

1. Степаненко В.Д., Щукин Г.Г., Бобылев Л.П., Матросов С.Ю. Радиотеплолокация в метеорологии. – Л.: Гидрометеиздат, 1987. – 284 с.
2. Тучков Л.Г. Естественные шумовые излучения в радиоканалах. - М.: Сов.радио, 1968. - 152 с.
3. Башаринов А.Е., Гурвич А.С., Егоров С.Т. Радиоизлучение Земли как планеты. – М.: Наука, 1974. – 188 с.
4. Краус Дж. Д. Радиоастрономия. Пер. с англ. Под ред. В.В. Железнякова – М.: Сов.радио, 1973. – 456 с.
5. Богородский В.В., Козлов А.И., Тучков Л.Т. Радиотепловое излучение земных покровов / Под ред. В.В. Богородского. - Л.: Гидрометеиздат, 1977. - 574 с.
6. В.В. Богородский, А.И. Козлов Микроволновая радиометрия земных покровов/ Под ред. В.В. Богородского – Л: Гидрометеиздат, 1985. – 272 с.
7. Цейтлин Н.М. Антенная техника и радиоастрономия. – М.: Сов.радио, 1976. – 352 с.
8. Федосеева Е.В., Щукин Г.Г. Вопросы метрологического обеспечения радиотеплолокационных измерений в условиях действия внешних шумовых помех: моногр. – Муром: ИПЦ МИ ВлГУ, 2012. – 104 с.
9. 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. – С.50 – 62.
10. Федосеева Е.В., Щукин Г.Г. Погрешность абсолютных радиотеплолокационных измерений при неоднородном фоновом шуме // Научный вестник МГТУ ГА. – Выпуск 186. – С 43 – 48.
11. Федосеева Е.В., Щукин Г.Г. Оценка влияния неточности компенсации фонового шума на погрешность относительных радиотеплолокационных измерений // Научный вестник МГТУ ГА. – Выпуск 186. – С 58 – 61.