

Электродинамика и антенные системы

УДК 621.396.67.

ВЛИЯНИЕ НАПРАВЛЕННЫХ СВОЙСТВ АНТЕННЫ СВЧ РАДИОМЕТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ НА ТОЧНОСТЬ КАЛИБРОВКИ ПО ИЗЛУЧЕНИЮ АТМОСФЕРЫ

Федосеева Елена Валерьевна

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Радиотехника»
Муромского института (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский Государственный
университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых»¹.
E-mail: elenafedoseeva@yandex.ru.

Щукин Георгий Георгиевич

доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры «Технологии и средства
геофизического обеспечения» ФГБВОУ ВО «Военно-космическая академия имени
А.Ф. Можайского» Министерства обороны РФ (ВКА им. А.Ф. Можайского)².
E-mail: ggshchukin@mail.ru.

Кольцов Иван Алексеевич

магистрант кафедры «Радиотехника» Муромского института (филиала)
ФГБОУ ВО «Владимирский Государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых»¹.
E-mail: iwan.koltsov@yandex.ru.

¹Адрес: 602264, Россия, Владимирская обл., г. Муром, ул. Орловская, д. 23.

²Адрес: 197082, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д. 13.

Аннотация: Рассмотрены условия возникновения погрешности калибровки СВЧ радиометрической системы по собственному радиотепловому излучению атмосферы, обусловленной конечной направленностью антенны и эффектом «антенного сглаживания», т.е. формированием сигнала СВЧ радиометрической системы, эквивалентного усреднённой радиояркой температуре по угловой области главного лепестка диаграммы направленности антенны. Рассмотрены принципы калибровки СВЧ радиометрической системы по радиотепловому излучению атмосферы и условия получения калиброванных значений радиояркой температуры. Получены аналитические выражения для величин абсолютной и относительной погрешности калибровки по излучению атмосферы в направлении в зенит и дополнительному зенитному углу. Выполнены расчёты относительных погрешностей калибровки по величине радиояркой температуры атмосферы в зените в зависимости от относительного размера апертуры антенны в пределах от пяти до ста длин волн с учётом приёма по главному лепестку диаграммы направленности антенны. Результаты расчёта относительной погрешности позволили численно оценить влияние направленных свойств антенны на погрешность калибровки СВЧ радиометрической системы по излучению атмосферы: полученные данные показали различие на порядок погрешности калибровки, связанной с эффектом «антенного сглаживания» по главному лепестку диаграммы направленности антенны в направлении в зенит и по дополнительному зенитному углу.

Ключевые слова: радиояркая температура, СВЧ радиометрическая система, калибровка по излучению атмосферы, относительная погрешность, диаграмма направленности.

Введение

СВЧ радиометрические измерения радиотеплового излучения атмосферы позволяют дистанционно оценивать высотные профили распределения температуры и влажности, а

также определять интегральное водо- и влаго-содержание атмосферы [1–6]. Оценка метеопараметров атмосферы основана на решении обратных задач взаимосвязи метеопараметров и радиояркой температуры собственного

радиотеплового излучения. Поэтому перевод выходного сигнала СВЧ радиометрической системы в величину радиояркой температуры обязательный этап дистанционного зондирования атмосферы и выполняется посредством калибровки СВЧ радиометрической системы [1, 3–6].

Выходной сигнал СВЧ радиометрической системы пропорционален мощности принимаемого радиотеплового излучения, поэтому на практике принимают линейную форму взаимосвязи этих величин, что позволяет ограничиться измерениями радиотеплового излучения двух пространственных областей, радиояркая температура которых известна заранее или определена с высокой точностью [1, 7–10].

Различают внутреннюю и внешнюю калибровку СВЧ радиометрической системы [1, 7–10]. При внутренней калибровке на вход радиометрического приёмника поочередно подключают детерминированные источники радиощумового сигнала, например, генераторы шумового сигнала или сопротивления при фиксированной термодинамической температуре. В этом случае калибровка позволяет исключить влияние параметров радиометра системы на процесс измерения радиояркой температуры. Но при внутренней калибровке остаётся неучтённым влияние антенны и фидера на результаты измерений (коэффициента усиления антенны, её собственного радиотеплового излучения, коэффициента потерь фидера). Более полной, с точки зрения учёта влияния параметров системы, является внешняя калибровка, т.е. калибровка по внешним источникам радиотеплового излучения, расположенным на удалении от антенны, радиояркая температура которых известна [1, 7, 9]. Сложность практической реализации такой калибровки состоит в необходимости удаления источников в дальнюю зону антенны и выполнения их размером, перекрывающим в дальней зоне область главного лепестка диаграмм направленности (ДН) антенны с поддержанием фиксированной радиояркой температуры. Одним из вариантов выбора источника радио-

теплового излучения для внешней калибровки СВЧ радиометрической системы является использование протяжённых природных областей с известными излучательными свойствами. Так, для калибровки СВЧ радиометрических систем дистанционного зондирования атмосферы наземного базирования был предложен вариант калибровки по радиотепловому излучению однородной атмосферы [7–9].

В данной работе анализируются погрешности такой калибровки для СВЧ радиометрической системы с конечной пространственной направленностью антенны.

Принципы калибровки СВЧ радиометрической системы по излучению атмосферы

Для однородной атмосферы известны математические модели, позволяющие определить её радиояркую температуру для стандартных распределений температуры, давления, влажности, периода года, широты места. Кроме того возможны измерения этих величин с помощью радиозонда. Таким образом, антенна при наземных измерениях нисходящего радиотеплового излучения атмосферы принимает радиощумовой сигнал, который с определенной степенью точности может быть определён указанными методами для вертикального зондирования. В результате имеется один уровень отсчётного значения радиояркой температуры.

При высокой степени горизонтальной однородности атмосферы для получения второго отсчёта радиояркой температуры предложено проводить измерения под углом к зениту $\theta_{кл}$ [7, 8, 10]. При этом происходит увеличение длины пути луча в атмосфере, соответствующего направлению зондирования, что приводит к росту радиояркой температуры по закону

$$T_{ярк}(\theta) = T_{яркзенит} / \cos \theta, \quad (1)$$

где $T_{яркзенит}$ – радиояркая температура атмосферы при направлении в зенит.

Таблица 1.

Зенитный угол, $\theta_{кл}$	0°	48°11'	60°	66°25'	70°32'
Коэффициент роста оптической толщины атмосферы, k_a	1	1,5	2	2,5	3

Принято направления формирования второго уровня отсчёта радиояростной температуры для процедуры калибровки оценивать в величинах оптической толщины атмосферы, определяемой коэффициентом, задающим рост оптической толщины атмосферы, равным

$$k_a = \tau(\theta_{кл}) / \tau(0^0), \quad (2)$$

где τ – оптическая толщина атмосферы.

Данные по соответствию коэффициента роста оптической толщины атмосферы и зенитного угла приведены в таблице 1.

Таким образом, при угломестных измерениях радиотеплового излучения атмосферы формируются два отсчёта, которым можно поставить в соответствие два значения радиояростной температуры $T_{яркзенит}$ и $T_{ярк}(\theta)$. Погрешность при таком способе калибровки зависит от точности определения радиояростной температуры $T_{яркзенит}$ для конкретных условий проведения измерений, а также от соответствия условий получения второго уровня сигнала требованиям данного способа калибровки. Так, на погрешность могут повлиять точность установки угла визирования антенны и наличие эффекта антенного сглаживания из-за реального размера области главного лепестка ДН антенны СВЧ радиометрической системы, наличие приёма фонового излучения из области рассеяния антенны, уровень которого может существенно изменяться при приёме радиотеплового излучения атмосферы с дополнительного углового направления $\theta_{кл}$.

Моделирование результатов калибровки СВЧ радиометрической системы

Входной сигнал СВЧ радиометрической системы определяется величиной антенной температуры, которая согласно уравнению «ан-

тенного сглаживания» определяется выражением [11, 12]

$$T_a = \frac{\int T_{ярк}(\theta)F(\theta)d\theta}{\int_{4\pi} F(\theta)d\theta}, \quad (3)$$

где $T_{ярк}(\theta)$ – угломестное распределение радиояростной температуры в окружающем антенну пространстве; $F(\theta)$ – ДН антенны по мощности.

Для оценки влияния конечной ширины главного лепестка ДН антенны СВЧ радиометрической системы на погрешность её калибровки по собственному излучению атмосферы рассмотрим идеализированный случай идентичности условий приёма фоновых шумов при выполнении измерений в направлении зенита и дополнительного угла $\theta_{кл}$ при формировании двух уровней выходного сигнала системы. Согласно уравнению «антенного сглаживания» выходные сигналы СВЧ радиометрической системы в величинах антенных температур задаются выражениями [11]

$$T_{азенит} = \bar{T}_{яркзенит}(1 - \beta)\eta + \bar{T}_ф\beta\eta + (1 - \eta)T_0, \quad (4)$$

$$T_a(\theta_{кл}) = \bar{T}_{ярк}(\theta_{кл})(1 - \beta)\eta + \bar{T}_ф\beta\eta + (1 - \eta)T_0, \quad (5)$$

где $\bar{T}_{яркзенит}$ и $\bar{T}_{ярк}(\theta_{кл})$ – радиояростные температуры, усреднённые по области главного лепестка ДН антенны; β – коэффициент рассеяния антенны; η – КПД антенны; T_0 – термодинамическая температура антенны.

Усреднённые по области главного лепестка ДН антенны радиояростные температуры атмосферы для двух угловых направлений определяются следующим образом:

$$\bar{T}_{\text{яркзенит}} = \frac{\int_{\theta_{23}}^{\theta_{21}} T_{\text{ярк}}(\theta) F(\theta) d\theta}{\int_{\theta_{23}}^{\theta_{21}} F(\theta) d\theta}, \quad (6)$$

$$\bar{T}_{\text{ярк}}(\theta_{\text{кл}}) = \frac{\int_{\theta_{23}}^{\theta_{21}} T_{\text{ярк}}(\theta) F(\theta - \theta_{\text{кл}}) d\theta}{\int_{\theta_{23}}^{\theta_{21}} F(\theta) d\theta}. \quad (7)$$

С учётом угловой зависимости радиояр-
костной температуры однородной атмосферы
от зенитного угла (1) выражения (6) и (7) могут
быть записаны в виде

$$\bar{T}_{\text{яркзенит}} = T_{\text{яркзенит}} \int_{\theta_{23}}^{\theta_{21}} \frac{F(\theta)}{\cos\theta} d\theta / \int_{\theta_{23}}^{\theta_{21}} F(\theta) d\theta, \quad (8)$$

$$\bar{T}_{\text{ярк}}(\theta_{\text{кл}}) = T_{\text{ярк}}(\theta_{\text{кл}}) \frac{\int_{\theta_{23}}^{\theta_{21}} \frac{F(\theta - \theta_{\text{кл}})}{\cos(\theta)} d\theta}{\int_{\theta_{23}}^{\theta_{21}} F(\theta) d\theta}. \quad (9)$$

Погрешность калибровки при указанных
условиях будет характеризоваться степенью
отличия усреднённых значений $\bar{T}_{\text{яркзенит}}$ и
 $\bar{T}_{\text{ярк}}(\theta_{\text{кл}})$ от их фиксированных значений по
направлениям зенита $T_{\text{яркзенит}}$ и угла
 $\theta_{\text{кл}} - T_{\text{ярк}}(\theta_{\text{кл}})$ и может быть задана в виде

$$\begin{aligned} \Delta_{\text{кл}} &= \Delta_{\text{зенит}} + \Delta_{\theta_{\text{кл}}} = \\ &= \left| T_{\text{яркзенит}} - \bar{T}_{\text{яркзенит}} \right| + \\ &+ \left| T_{\text{ярк}}(\theta_{\text{кл}}) - \bar{T}_{\text{ярк}}(\theta_{\text{кл}}) \right|. \end{aligned} \quad (10)$$

Для получения общих результатов анализа
погрешности калибровки по радиотепловому
излучению однородной атмосферы перейдём к
величинам относительных погрешностей, т.е.
рассмотрим погрешность калибровки СВЧ ра-
диометрической системы относительно
радиояркостной температуры атмосферы в зе-
ните $T_{\text{яркзенит}}$

$$\begin{aligned} \delta_{\text{зенит}} &= \Delta_{\text{зенит}} / T_{\text{яркзенит}} = \\ &= 1 - \int_{\theta_{23}}^{\theta_{21}} \frac{F(\theta)}{\sin\theta} d\theta / \int_{\theta_{23}}^{\theta_{21}} F(\theta) d\theta. \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \delta_{\theta_{\text{кл}}} &= \Delta_{\theta_{\text{кл}}} / T_{\text{яркзенит}} = \\ &= \frac{\left(1 - \int_{\theta_{23}}^{\theta_{21}} \frac{F(\theta - \theta_{\text{кл}})}{\cos(\theta)} d\theta / \int_{\theta_{23}}^{\theta_{21}} F(\theta) d\theta \right)}{\cos\theta_{\text{кл}}}. \end{aligned} \quad (12)$$

Анализ влияния направленных свойств антенны на точность калибровки

Для анализа влияния направленных свойств
антенн на погрешность калибровки были вы-
полнены расчёты относительных погрешно-
стей для двух отсчётных уровней радиояр-
костной температуры по выражениям (11) и
(12) для антенн с круглой апертурой с относи-
тельными размерами D/λ в диапазоне значе-
ний от 5 до 100, для двух направлений форми-
рования второго уровня сигнала калибровки:
при приёме под зенитными углами $\theta_{\text{кл}} = 60^\circ$ и
 $\theta_{\text{кл}} = 70^\circ 32'$, что согласно таблице 1 соответ-
ствует коэффициенту роста оптической тол-
щины атмосферы $k_a = 2$ и $k_a = 3$.

Результаты расчёта погрешностей приведе-
ны на рис. 1, рис. 2.

Выполненные расчёты относительных по-
грешностей калибровки СВЧ радиометриче-
ской системы по радиотепловому излучению
атмосферы показали завышение усреднённого
значения радиояркостной температуры за счёт
эффекта «антенного сглаживания» и различие
в среднем на порядок относительных погреш-
ностей $\delta_{\text{зенит}}$ и $\delta_{\theta_{\text{кл}}}$ относительно величины ра-
диояркостной температуры в зените $T_{\text{яркзенит}}$.

Величины относительных погрешностей
 $\delta_{\text{зенит}}$ и $\delta_{\theta_{\text{кл}}}$ сильно зависят от относительного
размера апертуры антенны D/λ . Согласно
рис. 1 и рис. 2 при относительных размерах
апертур антенн более $D/\lambda = 30$, погрешность
 $\delta_{\text{зенит}}$ не превышает 0,01%, а $\delta_{\text{зенит}} - 0,1\%$.

Для двух анализируемых угловых
направлений формирования выходного сигнала,
соответствующего второму уровню калиб-

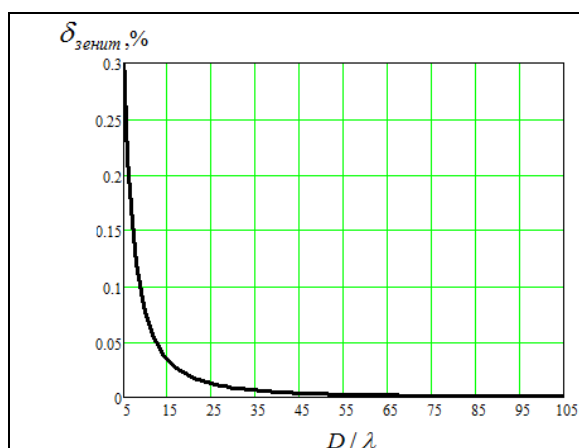


Рис. 1. Зависимость относительной погрешности $\delta_{\text{зенит}}$ от относительного размера апертуры антенны СВЧ радиометрической системы D/λ

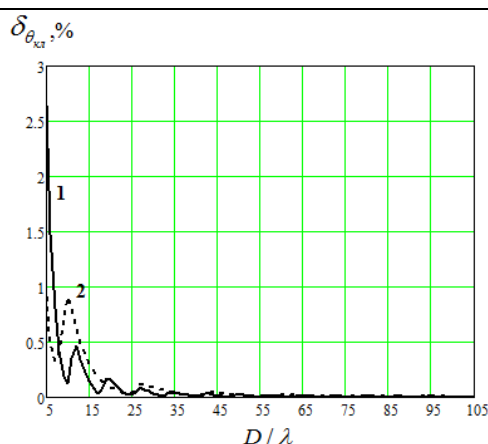


Рис. 2. Зависимость относительной погрешности $\delta_{\theta_{\text{кл}}}$ от относительного размера апертуры антенны СВЧ радиометрической системы D/λ :
1 – $\theta_{\text{кл}} = 60^\circ$, 2 – $\theta_{\text{кл}} = 70^\circ 32'$

рованного значения $\theta_{\text{кл}} = 60^\circ$ и $70^\circ 32'$, величины относительной погрешности $\delta_{\theta_{\text{кл}}}$ имеют одинаковый порядок с максимальным значением в единицы процентов.

Заключение

Полученные результаты анализа погрешности калибровки СВЧ радиометрической системы по радиотепловому излучению атмосферы показали возможность завышения фиксируемой радиояркой температуры за счёт эффекта «антенного сглаживания» по сравнению с соответствующей направлению визирования антенны радиояркой температуры атмосферы.

Погрешности калибровки, обусловленные конечной направленностью антенны СВЧ радиометрической системы, существенны при малых относительных размерах апертуры и не превышают единиц процентов даже при существенных отклонениях линии визирования антенны от зенита при формировании второго отсчётного калиброванного уровня выходного сигнала.

Литература

1. Степаненко В.Д., Щукин Г.Г., Бобылев Л.П., Матросов С.Ю. Радиотеплолокация в метеорологии. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 283 с.

2. Караваев Д.М., Щукин Г.Г. Применение методов СВЧ-радиометрии для диагноза содержания жидкокапельной влаги в облаках // Тр. НИЦ ДЗА. Сер. Прикладная Метеорология. 2004. Вып. 5 (533). С. 99–120.

3. Ware R.A. A multichannel radiometric profiler of temperature, humidity, and cloud liquid // Radio Science. 2003. Vol. 38. No. 4. 8079.

4. A network suitable microwave radiometer for operational monitoring of cloudy atmosphere / T. Rose, et.al. // Atmospheric Research. 2005. Pp. 183–200.

5. Karmakar P. Ground-Based Microwave Radiometry and Remote Sensing. Methods and Applications. Boca Raton: CRC Press, 2014. 220 p.

6. Рабинович Ю.И. О возможных погрешностях абсолютных измерений радиоизлучения // Труды ГГО. 1968. Вып. 222. С. 138–148.

7. Han Y., Westwater E.R. Analysis and Improvement of Tipping Calibration for Ground-based Microwave Radiometers // IEEE T. Geosci. Remote. 2000. Vol. 38. Pp. 1260–1276.

8. Maschwitz G., Löhnert U., Crewell S., Rose T., Turner D.D. Investigation of ground-based microwave radiometer calibration techniques at 530 hPa // Atmos. Meas. Tech. 2013. Vol. 6. Pp. 2641–2658.

9. Федосеева Е.В., Ростокин И.Н., Щукин Г.Г. Оценка условий приема в двухканальной СВЧ радиометрической системе по внешнему тестовому шумовому сигналу // Известия высших учебных заведений. Физика. 2016. Т. 59. № 12-3. С. 117–121.

10. Ростокин И.Н., Федосеева Е.В., Ростокина Е.А. Исследование вопросов реализации внешней калибровки многочастотной микроволновой радиометрической системы с компенсацией фонового излучения // VII Всероссийские Армандовские чтения. Современные проблемы дистанционного зон-

дирования, радиолокации, распространения и дифракции волн. Материалы Всероссийской научной конференции. 2017. С. 410–415.

11. Цейтлин Н.М. Антенная техника и радиоастрономия. М.: Сов. радио, 1976. 352 с.

Поступила 23 июля 2019 г.

12. Есепкина Н.А., Корольков Д.В., Парийский Ю.Н. Радиотелескопы и радиометры. М.: Наука, 1973. 416 с.

English

IMPACT OF ANTENNA DIRECTIONAL RESPONSE IN MICROWAVE RADIOMETRIC SYSTEM ON CALIBRATION ACCURACY THROUGH ATMOSPHERIC RADIATION

Elena Valeryevna Fedoseeva – Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, Professor of Radio Engineering Department, Murom Institute (Branch) Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education “Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletovs”¹.

E-mail: elenafedoseeva@yandex.ru.

Georgy Georgyevich Shchukin – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Department of Technologies and Army Geophysical Support Federal State-owned Military Educational Institution of Higher Education “Military Space Academy named after A.F. Mozhaysky”², Ministry of Defense of the Russian Federation.

E-mail: ggshchukin@mail.ru.

Ivan Alekseyevich Koltsov – Master's Degree Student, Murom Institute (Branch) Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education “Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletovs”¹.

E-mail: iwan.koltsov@yandex.ru.

¹*Address:* 602264, Russia, Vladimir region, Murom, Orlovskaya str., 23.

²*Address:* 197082, Russia, St. Petersburg, Zhdanovskaya str., 13.

Abstract: The article examines the impact of antenna directional response on external calibration error of microwave radiometric system through atmospheric own radio thermal radiation due to aerial smoothing effect and output signal forming in microwave radiometric system and which is equivalent to the averaged value of atmosphere brightness temperature as per angular domain of antenna beam main lobe, i.e. obtaining overestimated values of brightness temperature in relation to its value corresponding to antenna axis angular direction. The external calibration principles are considered for microwave radiometric system through atmospheric radiothermal radiation, which involves obtaining two measurements in the zenith direction and in the direction of additional zenith angle. An option is proposed to estimate the impact of antenna directional response on system calibration error through atmospheric radiation via introduction of radio brightness temperatures averaged over angular domain of antenna beam main lobe based on antenna smoothing equation. The expressions are obtained to estimate relative and absolute calibration errors of microwave radiometric system in respect to brightness temperature of atmosphere at zenith, which enabled performing an overall assessment of these errors without reference to absolute value of brightness temperature at zenith for specific bandwidth. The article presents the calculation data of relative calibration errors for two angular directions: in zenith and different to zenith direction when forming two reference calibrated levels of system output signals depending on antenna aperture ratio from five to one hundred wavelengths. The obtained results demonstrated a significant dependence of these errors on antenna aperture ratio. The maximum values of errors occurred at small aperture ratios from 5 to 20 for angular directions of 60° and 70°³², error values do not exceed very few percent, but calibration error in zenith direction turned out to be much lower than calibration error in additional zenith direction.

Keywords: radio brightness temperature, microwave radiometric system, calibration through atmospheric radiation.

References

1. *Stepanenko V.D., Schukin G.G., Bobylev L.P., Matrosov S.Yu.* Radiometry in meteorology. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1987. 283 p.
2. *Karavayev D.M., Schukin G.G.* Application of microwave radiometry methods for content analysis of cloud droplet moisture. Coll. of Papers RC DZA. Ed. Applied Meteorology. 2004. Iss. 5 (533). Pp. 99–120.
3. *Ware R.A.* A multichannel radiometric profiler of temperature, humidity, and cloud liquid. Radio Science. 2003. Vol. 38. No. 4. 8079.
4. A network suitable microwave radiometer for operational monitoring of cloudy atmosphere. T. Rose, et.al. Atmospheric Research. 2005. Pp. 183–200.
5. *Karmakar P.* Ground-Based Microwave Radiometry and Remote Sensing. Methods and Applications. Boca Raton: CRC Press, 2014. 220 p.
6. *Rabinovich Yu.I.* On probable errors of absolute measurements for radio-wave radiation. Academic Papers of Voeikov Main Geophysical Observatory. 1968. Iss. 222. Pp. 138–148.
7. *Han Y., Westwater E.R.* Analysis and Improvement of Tipping Calibration for Ground-based Microwave Radiometers. IEEE T. Geosci. Remote. 2000. Vol. 38. Pp. 1260–1276.
8. *Maschwitz G., Löhnert U., Crewell S., Rose T., Turner D.D.* Investigation of ground-based microwave radiometer calibration techniques at 530 hPa. Atmos. Meas. Tech. 2013. Vol. 6. Pp. 2641–2658.
9. *Fedoseeva E.V., Rostokin I.N., Shchukin G.G.* Assessment of reception conditions in two-channel microwave radiometric system through external test noise signal. News of Higher Educational Institutions. Physics. 2016. Vol. 59. No. 12-3. Pp. 117–121.
10. *Rostokin I.N., Fedoseeva E.V., Rostokina E.A.* Research of implementation issues for external calibration of multi-frequency microwave radiometric system with background radiation compensation. the VII All-Russian Armand readings. Current problems of remote sensing, radar, propagation and diffraction of radio waves. Proceedings of the all-Russian Scientific Conference. 2017. Pp. 410–415.
11. *Tseitlin N.M.* Aerial equipment and radio astronomy. Moscow: Soviet radio, 1976. 352 p.
12. *Esepkina N.A., Korolkov D.V., Parijskij Yu.N.* Radio telescopes and radiometers. Moscow: Nauka, 1973. 416 p.