РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ 2021, том 8, выпуск 1, с. 11–23

— РАДИОТЕХНИКА И КОСМИЧЕСКАЯ СВЯЗЬ —

УДК 551.466 + 621.396 DOI 10.30894/issn2409-0239.2021.8.1.11.23

Спутниковая СВЧ-радиометрия для решения задач дистанционного зондирования Земли

И.А.Барсуков, contact@spacecorp.ru

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

В. В. Болдырев, contact@spacecorp.ru

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

М. И. Гаврилов, к. т. н., contact@spacecorp.ru

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Г.Е.Евсеев, contact@spacecorp.ru

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

А. Н. Егоров, к. т. н., contact@spacecorp.ru

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

П. А. Ильгасов, contact@spacecorp.ru

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

В. Ю. Панцов, contact@spacecorp.ru

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Н. И. Стрельников, contact@spacecorp.ru

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

А. М. Стрельцов, contact@spacecorp.ru

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

И.В.Черный, *д. т. н., icherny@cpi.infospace.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Г.М.Чернявский, член-корр. РАН, д.т.н., профессор, contact@spacecorp.ru

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

В. В. Яковлев, к. ф-м. н., contact@spacecorp.ru

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Аннотация. Рассматриваются вопросы развития в России направления спутниковой СВЧ-радиометрии в интересах оперативной метеорологии и океанографии. Проводится анализ современного состояния российских и зарубежных радиометрических средств ДЗЗ в микроволновом диапазоне. Анализируются технические характеристики бортовых многоканальных микроволновых радиометров, совмещающих в себе функции сканера и зондировщика. Рассматриваются вопросы метрологического обеспечения микроволновых измерений аппаратуры, установленной на отечественных спутниках серии «Метеор-М». Подробно анализируется оригинальный метод внутренней калибровки микроволнового сканера/зондировщика МТВЗА-ГЯ с целью формирования шкалы антенных температур. Блок калибровки МТВЗА-ГЯ обеспечивает измерение интенсивности излучения двух согласованных нагрузок с известными яркостными температурами («горячей» и «холодной»). В качестве «горячей» нагрузки используется бортовой калибратор — имитатор абсолютно черного тела, яркостная температура которого находится в пределах 240–300 К. В качестве «холодной» нагрузки используется фоновое реликтовое излучение с яркостной температурой 2,73 К, которое принимается калибровочной антенной, ориентированной в космическое пространство. Абсолютная (внешняя) калибровка представляет собой переход от антенных к яркостным температурам и выполняется с помощью высокоточных радиационных расчетов для специально выбранных природных полигонов. Рассматриваются вопросы предварительной обработки данных МТВЗА-ГЯ и приводятся примеры микроволновых изображений Земли в шкале яркостных температур.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, СВЧ-радиометрия, внутренняя и абсолютная калибровки, антенна, микроволновый сканер/зондировщик, антенные и яркостные температуры, спутник, радиометр, обработка данных ДЗЗ

РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ 2021, том 8, выпуск 1, с. 11–23

— РАДИОТЕХНИКА И КОСМИЧЕСКАЯ СВЯЗЬ —

Satellite Microwave Radiometry for Earth Remote Sensing

I. A. Barsukov, contact@spacecorp.ru

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

V. V. Boldyrev, contact@spacecorp.ru

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

M.I.Gavrilov, Cand. Sci. (Engineering), contact@spacecorp.ru

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

G. E. Evseev, contact@spacecorp.ru

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

A. N. Egorov, Cand. Sci. (Engineering), contact@spacecorp.ru Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

P.A.II'gasov, contact@spacecorp.ru

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

V. Yu. Pantsov, contact@spacecorp.ru

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

N. I. Strel'nikov, contact@spacecorp.ru

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

A. M. Strel'tsov, contact@spacecorp.ru

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

I. V. Chernyy, Dr. Sci. (Engineering), icherny@cpi.infospace.ru Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

G. M. Chernyavskiy, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences,

Dr. Sci. (Engineering), Prof., contact@spacecorp.ru

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

V. V. Yakovlev, Cand. Sci. (Phys.-Math.), contact@spacecorp.ru

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

Abstract. The issues of development of the direction of satellite microwave radiometry in Russia in the interests of operational meteorology and oceanography are considered. The analysis of the current state of Russian and foreign radiometric ERS equipment in the microwave range is carried out. The technical characteristics of onboard multichannel microwave radiometers, combining the functions of a scanner and a sounder, are analyzed. The issues of metrological support of microwave measurements of equipment installed on Russian satellites of the Meteor-M series are considered. The original method of internal calibration of the MTVZA-GYA microwave scanner/sounding device is analyzed in detail in order to form the antenna temperature scale. The MTVZA-GYA calibration unit measures the radiation intensity of two matched loads with known brightness temperatures ("hot" and "cold"). An on-board calibrator is used as a "hot" load, it serves as an imitator of an absolutely black body, its brightness temperature of which is in the range of 240–300 K. Absolute (external) calibration is a transition from antenna to brightness temperatures and is performed using high-precision radiation calculations for specially selected natural testing sites. The issues of preliminary processing of MTVZA-GYA data are considered and examples of microwave images of the Earth in the scale of brightness temperatures are given.

Keywords: remote sensing, microwave radiometry, internal and absolute calibration, antenna, microwave scanner/sounder, antenna and brightness temperatures, satellite, radiometer, remote sensing data processing

Главная задача спутникового дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) — получение количественных сведений о явлениях и процессах в атмосфере и на поверхности Земли на различных пространственно-временных масштабах. Эти сведения необходимы для понимания взаимосвязей между различными сферами Земли и для принятия важных решений, влияющих на условия жизни людей. Одним из важнейших спутниковых методов изучения окружающей среды является пассивное (радиометрическое) микроволновое зондирование, обеспечивающее получение количественной информации о характеристиках и эволюции среды независимо от времени суток и облачности.

Задачи, решаемые методом СВЧ-радиометрии в интересах оперативной метеорологии и океанографии, включают:

- определение вертикального профиля температуры атмосферы;
- определение вертикального профиля влажности атмосферы;
- определение интегральной влажности (паросодержания) атмосферы;
- определение водозапаса облаков;
- определение интенсивности (водосодержания слоя) осадков;
- определение скорости и направления приводного ветра;
- определение температуры поверхности океана;
- определение влажности почв;
- определение температуры поверхности земных покровов;
- мониторинг ледовых покровов (сплоченность, возраст, тип льда);
- мониторинг снежных покровов (водный эквивалент, толщина);
- диагностику внутриокеанических процессов (синоптические вихри, фронтальные зоны, течения и др.).

Первые в мире микроволновые измерения Земли были осуществлены более 50 лет тому назад с отечественного спутника «Космос-243», который был запущен 23 сентября 1968 г. Измерения с орбиты велись на частотах 3,4, 9,6, 22,2 и 37,0 ГГц в трассовом режиме [1–3]. Практическое применение спутниковых микроволновых радиометров началось в конце 1970-х гг., когда в США был запущен спутник Nimbus-7 со сканирующим микроволновым радиометром на борту SMMR. Радиометр принимал излучение Земли на вертикальной и горизонтальной поляризациях на частотах 6,6, 10,7, 18, 21 и 37 ГГц в полосе обзора шириной 780 км при угле падения 50° [3]. Измерения использовались для получения глобальных данных о температуре поверхности океана, скорости ветра, интегрального содержания водяного пара в атмосфере и капельной воды в облаках, о характеристиках ледяного покрова.

В 1979–1991 гг. со спутников NOOA-6, -7 -9, -10, -11 и -12 проводились измерения зондировщиком MSU в диапазоне частот 50–58 ГГц, которые использовались для восстановления профиля температуры тропосферы и стратосферы [3, 4]. В 1987 г. на орбиту Земли в рамках метеорологической спутниковой программы министерства обороны США был запущен космический аппарат (KA) DMSP F08 с микроволновым сканером SSMI на борту. Сканирующий радиометр SSMI принимал излучение Земли на частотах 19,3, 22,2, 37,0 и 85,5 ГГц на вертикальной и горизонтальной поляризациях. По данным измерений определялись параметры подстилающей поверхности и интегральные параметры атмосферы [3,5].

Установленный на КА DMSP F11 в 1991 г. приборный комплекс, наряду со сканером SSM/I, включал зондировщики SSM/T-1 и SSM/T-2, предназначенные для определения профиля температуры тропосферы и стратосферы по измерениям на нескольких частотах в диапазоне 50-58 ГГц и профиля влажности в тропосфере по измерениям в области сильной линии поглощения водяного пара на 183,31 ГГц соответственно [6]. С 1998 г. на спутниках серии NOAA также устанавливаются температурный AMSU-А и влажностный AMSU-В зондировщики [7], предназначенные для обеспечения стран — членов ВМО стандартной гидрометеорологической информацией. Включение данных AMSU-А/-В в схемы численного прогноза погоды привело к существенному повышению качества прогноза.

Первый отечественный сканер «Икар-Дельта», предназначенный для экспериментов по определению интегральных метеопараметров атмосферы,

был выведен на орбиту в 1996 г. в составе модуля «Мир-Природа» [8]. Затем на орбиту был выведен сканер МИВЗА в составе КА «Метеор-ЗМ» [9].

В России спутниковая СВЧ-радиометрия является одной из немногих динамично развивающихся технологий ДЗЗ благодаря исследованиям и разработкам ФГУП «Центр космических наблюдений» (впоследствии — Научно-технологический центр «Космонит», а ныне — отделение 60 АО «Российские космические системы»).

За указанный период коллективом были созданы приборы для КА «Метеор-ЗМ» (МТВЗА, запуск осуществлен в 2001 г.); КА «Сич-1М» (МТВЗА-ОК, запуск осуществлен в 2004 г.); КА «Метеор-М» (МТВЗА-ГЯ, запуск КА № 1 осуществлен в 2009 г., запуск КА № 2 осуществлен в 2014 г., запуск КА № 2-1 в 2017 г. был аварийным, запуск КА № 2-2 осуществлен в 2019 г.); МКА «Канопус-СТ» (МИРАМ-К, запуск в 2015 г. был аварийным) [10–14]. Идет разработка перспективного СВЧ-радиометра МТВЗА-ГЯ-МП для КА «Метеор-МП», запуск которого планируется после 2025 г. [15].

В 2001 г. начались летные испытания многофункционального СВЧ-радиометра МТВЗА в составе КА «Метеор-ЗМ». Рабочий диапазон частот МТВЗА составлял 18–183 ГГц. Прием излучения осуществлялся по 21 каналу [10]. Такие характеристики ознаменовали окончание монополии США в области спутниковой микроволновой метеорологии.

К моменту запуска на орбиту конструкция прибора MTB3A не имела аналогов и являлась уникальной. В MTB3A были конструктивно объединены функции сканера, аналогичного SSM/I, и зондировщиков, таких как SSM/T-1/T-2 и AMSU-A/-B. Прибор стал первым в мировой практике спутниковым сканером/зондировщиком, предназначенным для определения стандартных гидрометеорологических параметров атмосферы и подстилающей поверхности в квазиреальном масштабе времени. Два года спустя в 2003 г. был выведен на орбиту американский аналог MTB3A — сканер/зондировщик SSMIS в составе KA DMSP F16 [16].

В настоящее время микроволновый сканер/зондировщик МТВЗА-ГЯ является одним из основных видов целевой аппаратуры на борту

метеорологических спутников серии «Метеор-М». По данным МТВЗА-ГЯ могут быть восстановлены паросодержание атмосферы, водозапас облаков, скорость приводного ветра, вертикальные профили температуры и влажности атмосферы и т. д.

По информационным характеристикам и области применения радиометр МТВЗА-ГЯ соответствует зарубежным аналогам — зондировщикам AMSU-A, AMSU-B (спутники NOAA, США; MetOp, EC); ATMS (спутник SNPP, США) [17]; сканерам AMSR-E (спутник SNPP, США), AMSR2 (спутник GCOM-W1, Япония) [18] и сканеру/зондировщику SSMIS (спутники DMSP F16– F19, США).

Основные технические характеристики микроволнового сканера/зондировщика МТВЗА-ГЯ приведены в табл. 1.

Параметр	Значение		
Диапазон, ГГц	10,6, 18,7, 23,8, 31,5, 36,5, 42, 48, 52–57, 91,65, 183,31		
Количество каналов	29		
Апертура антенны, м	0,65		
Угол визирования, град	53,3		
Угол падения, град	65		
Пространственное разреше- ние, км	16-198		
Чувствительность, К/пиксель	0,3-0,9		
Полоса обзора, км	1500-2500		
Сканирование	коническое, круговое		
Режим работы	непрерывный		
Период сканирования, с	2,5		
Нестабильность вращения сканера	10^{-04}		
Поток данных, кбит/с	35		
Объем ЗУ, Мбайт	256		
Масса, не более, кг	94		
Потребление, не более, Вт	80		

Центральная частота, ГГц	Поляри- зация	Количество полос	Ширина полосы, МГц	Пространственное разрешение (антенное пятно), км × км	Приведенный пиксель изображения, км × км	Чувстви- тельность не хуже, К/пиксель	Высота максимума весовой функции, км
10,6	V, H	1	100	89 imes 198	32×32	0,5	-
18,7	V, H	1	200	52×116	32×32	0,4	-
23,8	V, H	1	400	42×94	32×32	0,3	_
31,5	V, H	1	1000	35 imes 76	32×32	0,3	_
36,5	V, H	1	1000	30 imes 67	32×32	0,3	_
42,0	V, H	1	1000	26 imes 60	32×32	0,4	_
48,0	V, H	1	1000	24×43	32×32	0,4	_
91,655	V, H	2	2500	14×30	16×16	0,6	_
52,80	V	1	400	21×48	48 imes 48	0,4	2
53,30	V	1	400	21×48	48 imes 48	0,4	4
53,80	V	1	400	21×48	48 imes 48	0,4	6
54,64	V	1	400	21×48	48 imes 48	0,4	10
55,63	V	1	400	21×48	48 imes 48	0,4	14
$F_0 \pm 0, 1$	Н	4	50	21×48	48 imes 48	0,4	20
$F_0 \pm 0.05$	Н	4	20	21×48	48 imes 48	0,7	25
$F_0\pm0,025$	Н	4	10	21×48	96 imes96	0,5	29
$F_0 \pm 0,01$	Н	4	5	21×48	96 imes 96	0,7	35
$F_0\pm0,005$	Н	4	3	21×48	96 imes 96	0,9	42
183,31 1,4	V	2	500	9×21	32×32	0,8	4,7
183,31 3,0	V	2	1000	9×21	32×32	0,6	2,9
183,31 7,0	V	2	1500	9×21	32×32	0,5	1,5

Таблица 2. Информационные характеристики радиометрических каналов МТВЗА-ГЯ, приведенные к орбите КА «Метеор-М» (высота 830 км)

 $F_0 = 57,2903 \pm 0,3222$ ГГц, V — вертикальная поляризация, Н — горизонтальная поляризация

Радиометрические каналы сканера МТВЗА-ГЯ включают рабочие частоты в окнах прозрачности атмосферы 10,6, 18,7, 23,8, 31,5, 36,5, 42, 48 и 91 ГГц, а зондировщика — в полосе поглощения кислорода 52–57 ГГц и в области резонансной линии водяного пара 183,31 ГГц. Информационные характеристики радиометрических каналов

Радиометрические каналы сканера МТВЗА-ГЯ МТВЗА-ГЯ для орбиты КА «Метеор-М» высотой очают рабочие частоты в окнах прозрачно- 830 км приведены в табл. 2.

Антенная система МТВЗА-ГЯ представляет собой однозеркальную антенну с боковым облучением параболического зеркала апертурой 0,65 м. Групповой многочастотный антенный облучатель находится в фокальной плоскости и включает четыре рупора, каждый из которых оптимизирован в диапазоне 10,6–23,8, 31,5–48, 52–91 и 176–190 ГГц [19].

В сканерных каналах измерения проводятся на двух ортогональных поляризациях. Кросс-поляризационная развязка — не хуже —23 дБ.

К достоинствам МТВЗА-ГЯ следует отнести комбинацию в одном приборе каналов сканера и зондировщика, наличие новых частот 42,0 и 48,0 ГГц и зондирование под углом 65°, что открывает дополнительные возможности для оценки гидрометеорологических параметров и наблюдения внутриокеанических процессов [20], а также расширение полосы обзора до 2500 км.

Схема кругового конического сканирования МТВЗА-ГЯ построена таким образом, что визирование производится в направлении кормы КА (рис. 1). Направление скана — слева направо с рабочим сектором 105° (от —90° до 15° относительно трассы спутника), что обеспечивает полосу обзора 1500 км. Угол визирования составляет 53,3°, а угол падения — 65°. Несимметричность сектора сканирования связана с максимальной реализацией поля незатенения элементами конструкции КА.

За период сканирования 2,5 с перемещение нормали спутника составляет 16 км, что сравнимо



Рис. 1. Геометрия наблюдения МТВЗА-ГЯ с орбиты КА «Метеор-М»

с элементом пространственного разрешения микроволнового радиометра в каналах 91 ГГц и 183 ГГц. Поэтому масштаб 16 × 16 км выбран в качестве пространственного элемента квантования сигнала (для всех радиометрических каналов).

На этапе предварительной обработки данных в наземных условиях производится процедура пространственного усреднения (сглаживания) изображений в отдельных каналах до размеров пикселя 32×32 км и 48×48 км (табл. 2), что обеспечивает повышение чувствительности в два и три раза соответственно. С этой целью для стратосферных каналов (высота максимума весовой функции 29–42 км), информация которых используется главным образом для климатических исследований, приведенный пиксель имеет размер 96×96 км.

Система сканирования представляет собой прецизионную вращающуюся платформу, на которой размещены: параболическая антенна, облучатели, приемники СВЧ-излучения, микропроцессорный блок предварительной обработки данных и вторичные источники питания. Данная конструкция необходима для того, чтобы обеспечить постоянство угла визирования и положения поляризационного базиса прибора на протяжении всего рабочего сектора, что имеет принципиальное значение для каналов в окнах прозрачности атмосферы (сканерные каналы), где доминирующий вклад составляет поляризованное излучение подстилающей поверхности. Организованная таким образом схема сканирования позволяет исключить влияние третьего параметра Стокса на результаты поляризационных измерений, что характерно для схемы линейного кругового сканирования, которая применяется в зондировщиках [17].

В спутниковом СВЧ-радиометре МТВЗА-ГЯ реализован оригинальный метод внутренней калибровки [13, 14], учитывающий особенности построения и функционирования прибора (компенсационная схема построения приемников, режим конического кругового сканирования, многочастотный режим измерений).

Бортовая калибровка радиометрических каналов МТВЗА-ГЯ с целью определения шкалы антенных температур проводится по двухточечной схеме на каждом периоде сканирования вне рабочего сектора. Блок калибровки МТВЗА-ГЯ обеспечива-

ет измерение интенсивности излучения двух согласованных нагрузок с известными яркостными температурами («горячей» и «холодной»). В качестве «горячей» нагрузки используется бортовой калибратор — имитатор абсолютно черного тела, яркостная температура которого находится в пределах 240–300 К.

В качестве «холодной» нагрузки используется фоновое реликтовое излучение с яркостной температурой 2,73 К [13, 14], которое принимается калибровочной антенной, ориентированной в космическое пространство.

В предположении линейности калибровочной функции (функции перехода от сигнала $U_{\rm c}^i$ к антенным температурам) величина T_a^i для каждого пикселя в рабочем секторе определяется выражением

$$T_a^i = (\overline{T_r} - T_x) \frac{(U_c^i - \overline{U_x^i})}{\overline{U_r^i - U_x^i}} + T_x, \tag{1}$$

где $T_{\rm r} = \varepsilon t_{\rm r}$ — яркостная температура калибратора («горячей» нагрузки) в кельвинах, $t_{\rm r}$ — физическая температура калибратора, ε — излучательная способность калибратора (составляет не менее 0,999), i — индекс радиометрического канала, $T_{\rm x} = 2,73$ К — яркостная температура реликтового фона («холодной» нагрузки), U^i — выходное напряжение в милливольтах.

Для уменьшения погрешности внутренней калибровки величины T^i_{Γ} , U^i_{Γ} , U^i_{χ} и их разности в выражении (1) усредняются по данным измерений на m последовательных сканах (10 < m < 60, величина m уточняется на этапе летных испытаний прибора).

В качестве примера на рис. 2 приведены записи калибровочных сигналов МТВЗА-ГЯ в канале 183,31 ± 7,0 ГГц для трех витков КА «Метеор-М» № 2-2 за 06 августа 2019 г. Физическая температура калибратора при переходе с солнечной стороны орбиты на теневую меняется от -27 до -31 °С. Яркостная температура калибратора изменяется соответствующим образом в пределах от 242 до 246 К. При этом яркостная температура космического пространства регистрируется на всех витках спутника на уровне 2,73 К. Известно [21,22], что яркостная температура реликтового излучения характеризуется высоким постоянством и изотропностью: вариации излучения не превышают ±0,1 мК. Положительные приращения в пределах 3–8 мК обусловлены излучением Млечного Пути, и из-за малости величины по сравнению с собственными шумами СВЧ-радиометра их можно не учитывать.

Погрешность измерения физической температуры калибратора не превышает 0,05 °С. Поэтому погрешность (стабильность) яркостной шкалы определяется в основном инструментальным шумом (величиной «шумовой дорожки» при соответствующей постоянной времени). Для всех радиометрических каналов прибора МТВЗА-ГЯ погрешность шкалы антенных температур составляет 0,5–1,2 К [23].

Таким образом, в соответствии с выражением (1) яркостная шкала СВЧ-радиометра МТВЗА-ГЯ привязана к уровню реликтового излучения космического пространства. Можно поэтому обоснованно утверждать, что измерения МТВЗА-ГЯ характеризуются высокой абсолютной стабильностью (рис. 2).

В действительности зависимость (1) является нелинейной из-за наличия квадратичного детектора в тракте микроволнового радиометра. Погрешность, обусловленная нелинейностью радиометрического тракта, является, однако, систематической и не превышает 0,4 К. Ею, как правило, пренебрегают, поскольку измерения яркостной температуры производятся со случайной погрешностью 0,5–1,5 К/пиксель и, кроме того, систематическая погрешность абсолютной калибровки бортовых микроволновых радиометров составляет порядка 2–3 К [5,7]. Отметим здесь, что в зарубежном аналоге МТВЗА-ГЯ — радиометре ATMS на спутнике SNPP — впервые использована нелинейная процедура внутренней калибровки [17].

В период летных испытаний космических аппаратов «Метеор-М» проводится оценка параметров радиометрических каналов и диаграммы направленности антенны МТВЗА-ГЯ, в том числе каналов зондировщика, с помощью уникальной процедуры лимбовых измерений. Данная процедура включает временное изменение орбитальной ориентации КА (на нескольких витках) таким образом, чтобы рабочий сектор сканирования частично захватывал космическое пространство и обеспечивалась возможность лимбовых измерений. При этом, анализируя характер изменения излучения на границах таких контрастных областей, как диск планеты,



Рис. 2. Опорные калибровочные сигналы СВЧ-радиометра МТВЗА-ГЯ в канале 183,31±7,0 ГГц (КА «Метеор-М» № 2-2, 06.08.2019, витки 452, 453 и 454): *а*) физическая температура калибратора; *б*) яркостная температура космического пространства. Регистрограммы получены для постоянной времени $\tau = 30$ мс. Дисперсия шумов на «горячей» нагрузке — 0,37 К ($\tau = 30$ мс), что соответствует чувствительности канала 0,065 К ($\tau = 1$ с) и 0,45 К/пиксель

радиогоризонт и космический реликтовый фон, можно оценить ширину главного лепестка диаграммы направленности антенны, ее потоковую эффективность и уровень боковых лепестков [24], а также определить погрешность внутренней калибровки шкалы антенных температур [23].

Подобная методика оценки технических характеристик микроволновых радиометров в орбитальных условиях, связанная с маневром космического аппарата, применялась для многих микроволновых радиометров, например AMSR-E (спутник Aqua), TMI (спутник TRMM), SSMIS (спутники DMSP), WindSat (спутник Coriolis), ATMS (спутник Suomi NPP) [17, 25–27].

Переход от шкалы антенных температур СВЧрадиометра к шкале яркостных температур осуществляется на основе учета параметров диаграммы направленности антенны с помощью линейной функции вида:

$$T_{\mathfrak{s}}^n = A^n T_a^n + C^n, \qquad (2)$$

где A^n , C^n — коэффициенты, которые характеризуют, соответственно, потоковую эффективность антенны и вклад фонового излучения, принимаемого через боковые лепестки. Они определяются при абсолютной (внешней) калибровке с использованием модельных данных, полученных по радиационной модели системы «атмосфера — подстилающая поверхность». Входными данными в модели служат результаты подспутниковых (полигонных) измерений.

Выражение (2) справедливо для антенн с потоковой эффективностью не менее 90% [23]. Следовательно, сами параметры антенны не входят в выражение (2), а должны лишь подтверждать достаточную потоковую эффективность антенны. Здесь также не учитывается паразитный уровень сигнала с ортогональной поляризацией, поскольку для антенны с кроссполяризационной развязкой менее -23 дБ им можно пренебречь.

Процедура абсолютной калибровки СВЧ-радиометра МТВЗА-ГЯ подробно рассмотрена в работах [28–30]. Результаты сравнения временных рядов МТВЗА-ГЯ и СВЧ-радиометра AMSR2 (на спутнике Японии GCOM-W1) над тестовыми областями в лесах Амазонки, в Антарктиде и Гренландии демонстрируют высокую долговременную стабильность работы МТВЗА-ГЯ [29].

Следует отметить, что систематические погрешности, которые возникают при внутренней и абсолютной калибровках спутникового СВЧ-радиометра, в конечном счете могут быть скорректированы при валидации восстановленных метеопараметров на этапе тематической обработки данных с учетом результатов численного моделирования на основе радиационной модели и информации наземных буйковых и радиозондовых измерений [31–33].

Микроволновый сканер/зондировщик МТВЗА-ГЯ обладает измерительными свойствами и предназначен для получения количественных характеристик гидрометеорологических параметров атмосферы и подстилающей поверхности на основе измерений интенсивности восходящего излучения Земли в СВЧ-диапазоне.

Как известно [34], в СВЧ-диапазоне не существует национальных (государственных) стандартов яркости, в отличие от видимого и ИК-диапазонов. Тем не менее вопросы метрологического обеспечения СВЧ-измерений успешно решаются, и пассивные микроволновые методы широко применяются в спутниковой метеорологии уже на протяжении последних 40 лет [2–5].

Успешность решения указанных задач определяется как техническими характеристиками аппаратуры, так и методическим и алгоритмическим обеспечением и является результатом применения комплексного подхода, включая вопросы калибровки аппаратуры, тематической обработки данных и валидации полученных продуктов.

Таким образом, схема метрологического обеспечения СВЧ-радиометра МТВЗА-ГЯ включает три уровня.

Первый уровень — внутренняя калибровка и представление данных в шкале антенных температур.

Второй уровень — абсолютная (внешняя) калибровка и представление данных в шкале яркостных температур.

Третий уровень — получение гидрометеорологических параметров атмосферы и подстилающей поверхности в соответствующих единицах измерений на основе алгоритмов тематической обработки спутниковой информации и процедуры валидации

восстановленных параметров в соответствии с ре- Таблица 3. График запусков КА серии «Метеор-М» комендациями Всемирной метеорологической организации и Росгидромета.

В соответствии с Федеральной космической программой планируется осуществить восемь запусков КА «Метеор-М» (табл. 3). Таким образом, с учетом срока активного существования, который составляет не менее 5 лет, использование СВЧ-радиометра МТВЗА-ГЯ по целевому назначению в составе КА «Метеор-М» планируется вплоть до 2030 г. При этом будет осуществляться эксплуатация космической системы из двух спутников, находящихся на утренней и послеполуденной орбитах.

Рассмотренная выше (рис. 1) схема сканирования МТВЗА-ГЯ с полосой обзора 1500 км была реализована на КА «Метеор-М» №1 и №2, которые функционировали на солнечно-синхронной утренней орбите с временем пересечения экватора 09:00.

На самом деле, существует потенциальная возможность реализовать полосу обзора СВЧ-радиометра МТВЗА-ГЯ с орбиты высотой 830 км, шириной не менее 2000 км. Учитывая тот факт, что КА «Метеор-М» № 2-2 выведен на послеполуденную орбиту (15:00), в период летных испытаний МТВЗА-ГЯ проведены исследования положения солнечных панелей КА на витке в зависимо-

KA	Год запуска	Орбита
«Метеор-М» №1	2009	Утренняя (09:00)
«Метеор-М» №2	2014	Утренняя (09:00)
«Метеор-М» № 2-1	2017	Аварийный запуск
«Метеор-М» №2-2	2019	Послеполуденная (15:00)
«Метеор-М» № 2-3	2021	Утренняя (09:00)
«Метеор-М» № 2-4	2022	Послеполуденная (15:00)
«Метеор-М» №2-5	2024	Утренняя (09:00)
«Метеор-М» № 2-6	2025	Послеполуденная (15:00)

сти от местоположения Солнца и их влияния на затенение рабочего сектора МТВЗА-ГЯ.

В результате исследований отмечено, что затенение рабочего сектора МТВЗА-ГЯ происходит только на нисходящих витках и полезная зона по-прежнему ограничивается сектором 105°. В то же время на восходящих витках положение солнечных панелей открывает обзор более 120°, что позволяет реализовать полосу обзора вплоть до 2500 км.



50 100 150 200 250 300 K

Рис. 3. СВЧ-изображение Земли в канале 31,5 ГГц (ГП) МТВЗА-ГЯ КА «Метеор-М» № 2-2, 30.09.2019. Нисходящие витки. Полоса обзора 1500 км



Рис. 4. СВЧ-изображение Земли в канале 31,5 ГГц (ГП) МТВЗА-ГЯ КА «Метеор-М» № 2-2, 30.09.2019 г. Восходящие витки. Полоса обзора 2500 км

В качестве примера на рис. 3–4 приведены изображения Земли для нисходящих и восходящих витков. На нисходящих витках полоса обзора МТВЗА-ГЯ составляет 1500 км, на восходящих витках полоса обзора достигает 2500 км.

Данные результаты будут учитываться при создании СВЧ-радиометров МТВЗА-ГЯ-МП для КА «Метеор-МП» [15] с целью реализации полосы обзора 2500 км в штатном режиме.

Список литературы

- 1. Башаринов А.Е., Гурвич А.С., Егоров С.Т. Радиоизлучение Земли как планеты. М.: Наука, 1974. 187 с.
- Кутуза Б.Г., Митник Л.М., Аквилонова А.Б. Первый в мире эксперимент по микроволновому зондированию Земли из космоса на спутнике «Космос-243» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2019, т. 16, № 6. С. 9–30.
- Кутуза Б.Г., Данилычев М.В., Яковлев О.И. Спутниковый мониторинг Земли: Микроволновая радиометрия атмосферы и поверхности. М.: Ленанд, 2016. 338 с.
- 4. Spencer R. W., Christy J. R. Precision lower stratospheric temperature monitoring with the MSU:

Technique, validation, and results 1979-91 // Journal Climate, 1993, № 6. P. 1194-1204.

- Hollinger J.P., Pierce J.L., Poe G.A. SSM/I instrument and evaluation // IEEE Transaction Geoscience and Remote Sensing, 1990, vol. 28, № 5. P. 781–790.
- Falcone V.J., Griffin M.K., Isaacs R.G. et al. SSM/T-2 calibration data analyses // Proc. CO-MEAS'93 Symposium Albuquerque, NM. 1993. P. 165–168.
- 7. Rosenkranz P. W. Retrieval of temperature and moisture profiles from AMSU-A and AMSU-B measurements // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing, 2001, vol. 39, № 11. P. 2429–2435.
- Jackson T.J., Hsu A.Y., Shutko A. et al. Priroda microwave radiometer observations in the Southern Great Plains 1997 hydrology experiment // Intern. J. Remote Sensing, 2002, vol. 23, № 2. P. 231–248.
- Алексеев П.В., Викторов А.С., Волков А.М. и др. Микроволновый сканирующий радиометр интегрального влажностного зондирования атмосферы (МИВЗА) // Исследования Земли из космоса, 2003, № 6. С. 68–76.
- Черный И.В., Чернявский Г.М., Успенский А.Б., Пегасов В.М. СВЧ-радиометр МТВЗА спутника «Метеор-3М» № 1: Предварительные результаты летных испытаний // Исследование Земли из космоса, 2003, № 6. С. 1–15.

- Наконечный В.П., Панцов В.Ю., Прохоров Ю.Н. и др. Оптико-микроволновый сканер/зондировщик МТВЗА-ОК / Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных объектов и явлений. Сб. научных статей. М.: Полиграф сервис, 2004. С. 139–145.
- Чернявский Г. М. Отечественные технологии спутниковой СВЧ-радиометрии // Аэрокосмический курьер, 2007, № 6. С. 22–24.
- Болдырев В. В., Ильгасов П. А., Панцов В. Ю. и др. Спутниковый микроволновый сканер/зондировщик МТВЗА-ГЯ // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Сб. научных статей, 2008, т. 1, вып. 5. С. 243–248.
- Барсуков И.А., Никитин О.В., Стрельцов А.М. и др. Предварительная обработка данных СВЧ-радиометра МТВЗА-ГЯ КА «Метеор-М» № 1 / Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Сб. трудов Всероссийской научной конференции. М.: ДоМира, 2011. Т. 8, № 2. С. 257-264.
- Cherny I. V., Chernyavsky G. M., Mitnik L. M. et al. Advanced Microwave Imager/Sounder MTVZA-GY-MP for new Russian meteorological satellite // Proc. IGARSS'2017. Taxes, USA, 2017. P. 1220–1223.
- Kunkee D. B., Hong Y., Thompson D. A. et al. Analysis of the Special Sensor Microwave Imager Sounder (SSMIS) fields-of-view on DMSP F-16 // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 2008, vol. 46, № 4. P. 934–945.
- Weng F., Zou X., Sun N. et al. Calibration of Suomi National Polar-Orbiting Partnership (NPP) Advanced Technology Microwave Sounder (ATMS) // J. Geophys. Res. Atmosphere, 2013, vol. 118. P. 1–14.
- Imaoka K., Kachi M., Kasahara M. et al. Instrument performance and calibration of AMSR-E and AMSR2 // International Archives Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science, 2010, V. XXXVIII, Part 8, Kyoto, Japan.
- Gorobets N.N., Dakhov V.M., Cherny I.V. Millimeter-range multi-channel two polarization horn antenna / Third Intern. Symp. "Physics and Engineering of Millimeter and Sub-Millimeter Waves". Kharkov, 1998. P. 618–619.

- Cherny I. V., Raizer V. Yu. Passive Microwave Remote Sensing of Oceans. Wiley-Praxis, Chichester, 1998. 195 p.
- 21. Кардашев Н.С., Струков И.А. Спутниковый радиоастрономический эксперимент «Реликт» / Наука и человечество. М.: Знание, 1987. С. 173–185.
- 22. COBE Archives Page. http://aether.lbl.gov/www/ projects/cobe/COBE_home/cobe_home.html (Дата обращения 29.12.2020).
- 23. Барсуков И.А., Никитин О.В., Стрельцов А.М., Черный И.В. Калибровка СВЧ-радиометра МТВЗА-ГЯ // Космонавтика и ракетостроение, 2010, вып. 1 (58). С. 131–137.
- Веселов В.М., Милицкий Ю.А., Мировский В.Г. и др. Экспериментальная методика определения параметров антенн радиотепловых бортовых комплексов // Исследование Земли из космоса, 1981, № 2. С. 63-75.
- Wentz F. J., Ashcroft P., Gentemann C. Post-launch calibration of the TRMM Microwave Imager // IEEE Transactions Geoscience and Remote Sensing, 2001, vol. 39, № 2. P. 415–422.
- Imaoka K., Fujimoto Y., Kachi M. et al. Post-launch calibration and data evaluation of AMSR-E // In Proc. IGARSS, 2003, Jul. 21–25, vol. 1. P. 666–668.
- Jones W. L., Park J. D., Soisuvarn S. et al. Deepspace calibration of the WindSat radiometer // IEEE Transactions Geoscience and Remote Sensing, 2006, vol. 44, № 3. P. 476–495.
- Успенский А.Б., Асмус В.В., Козлов А.А. и др. Абсолютная калибровка каналов атмосферного зондирования спутникового микроволнового радиометра МТВЗА-ГЯ // Исследование Земли из космоса, 2016, № 5. С. 57–70.
- 29. Чернявский Г. М., Митник М. Л., Кулешов В. П. и др. Микроволновое зондирование океана, атмосферы и земных покровов по данным спутника «Метеор-М» № 2 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Сб. научных статей, 2018, т. 15, № 4. С. 78–100.
- Чернявский Г. М., Митник М. Л., Кулешов В. П. и др. Моделирование яркостных температур и первые результаты, полученные микроволновым радиометром МТВЗА-ГЯ со спутника «Метеор-М» № 2-2 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2020, т. 17, № 3. С. 51-65.

- 31. Митник Л. М., Митник М. Л., Чернявский Г. М. и др. Приводный ветер и морской лед в Баренцевом море по данным микроволновых измерений со спутников «Метеор-М № 1» и GCOM-W1 в январе-марте 2013 г. // Исследование Земли из космоса, 2015, № 6. С. 36-46.
- 32. Митник Л. М., Митник М. Л., Гурвич И.А. и др. Исследование эволюции тропических циклонов в северо-западной части Тихого океана по данным СВЧ-радиометров МТВЗА-ГЯ со спутника «Метеор-М» № 1 и AMSR-Е со спутника Aqua // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2012, т. 9, № 4. С. 121–128.
- 33. Гранков А.Г., Мильшин А.А., Шелобанова Н.К. и др. Многолетние вариации водяного пара в Северной Атлантике по данным спутниковых микроволновых измерений // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, 2015, т. 2, вып. 2. С. 47–52.
- 34. Юрчук Э.Ф., Арсаев И.Е. Метрологическое обеспечение микроволновых радиометров дистанционного зондирования Земли // Всероссийская научно-техническая конференция «Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий». 28–30 апреля 2008 г. Сб. трудов. М.: ОАО «Российские космические системы».