

Предварительная обработка данных СВЧ-радиометра МТВЗА-ГЯ КА «Метеор-М» №1

И.А. Барсуков, О.В. Никитин, А.М. Стрельцов,
И.В. Черный, Г.М. Чернявский

НТЦ «Космонит» ОАО «Российские Космические системы»
117997, г. Москва, ул. Профсоюзная, д. 84/32
E-mail: icherny@cpi.space.ru

В статье рассматриваются технические характеристики и назначение СВЧ-радиометра МТВЗА-ГЯ, установленного на борту космического аппарата (КА) «Метеор-М» №1. Описаны этапы предварительной обработки данных СВЧ-радиометра, включающие в себя: распаковку, географическую и временную привязку, радиометрическую калибровку, формирование файлов информационных продуктов.

Ключевые слова: Дистанционное зондирование Земли, метеорология, спутниковая радиометрия, микроволновый радиометр, радиотепловое излучение, антennaя температура, яркостная температура, калибровка радиометра.

Введение

В области дистанционного зондирования Земли сегодня широко используются средства СВЧ-радиометрии. Микроволновые методы позволяют определять широкий перечень метеорологических параметров атмосферы и подстилающей поверхности, например, профили температуры и влажности атмосферы, водозапас облаков, интенсивность осадков, температуру поверхности океана, направление и скорость приводного ветра, проводить мониторинг ледовых и снежных покровов, а также диагностику процессов деятельного слоя океана [1-3].

В НТЦ «Космонит» ОАО «Российские космические системы» создан спутниковый СВЧ-радиометр МТВЗА-ГЯ. Многофункциональный прибор МТВЗА-ГЯ – модуль температурного и влажностного зондирования атмосферы предназначен для глобального мониторинга Земли в интересах решения метеорологических задач. СВЧ-радиометр установлен на КА «Метеор-М» №1 (запуск состоялся 17 сентября 2009г.) и относится к классу спутниковых микроволновых радиометров нового поколения, совмещающих в себе одновременно функции сканера/зондировщика.

Технические характеристики МТВЗА-ГЯ

МТВЗА-ГЯ является модификацией приборов МТВЗА [4] КА «Метеор-3М» (запуск - 10 декабря 2001г.) и МТВЗА-ОК [5] КА «Сич-1М» (запуск - 24 декабря 2004г.). По техническим и информационным характеристикам МТВЗА-ГЯ не уступает современным зарубежным аналогам – зондировщикам AMSU-A, -B, установленным на спутниках серии NOAA, сканерам AMSR-E и SSM/I спутников Aqua и DMSP, а также сканеру/зондировщику SSMIS спутников новой серии DMSP на платформе 5D-3 [6].

СВЧ-радиометр МТВЗА-ГЯ обеспечивает зондирование, как в окнах прозрачности атмосферы (10.65, 18.7; 23.8; 31.5; 36.5; 42; 48 и 91.65 ГГц), так и в линиях поглощения кислорода (52-57 ГГц) и водяного пара (183.31 ГГц), что позволяет проводить температурно-влажностное профилирование атмосферы и определять интегральные параметры атмосферы и характеристики поверхности [7]. Основные технические характеристики прибора МТВЗА-ГЯ приведены в таблице 1.

Таблица 1. Технические характеристики МТВЗА-ГЯ

Параметры	МТВЗА-ГЯ
Диапазон	10.65, 18.7, 23.8 31.5, 36.5, 42, 48, 52-57, 91.65, 183.31, ГГц
Пространственное разрешение:	
- по горизонтали;	16-198 км
- по вертикали.	1.5-7 км
Полоса обзора	1500 км
Сканирование	коническое
Режим работы	непрерывный
Период сканирования	2.5 с
Поток данных	35 Кбит/с
Объем ЗУ	1 Гбайт
Масса, не более	94 кг
Потребление, не более	80 Вт

Предварительная обработка данных МТВЗА-ГЯ

Предварительная обработка данных СВЧ-радиометра МТВЗА-ГЯ осуществляется в специализированном программном комплексе и включает в себя следующие этапы: распаковку; географическую и временную привязку данных; калибровку; формирование обзорных изображений.

Распаковка данных

Исходными данными для программного комплекса являются файлы с записью битового потока сеанса приема информации с КА «Метеор-М» №1. Сброс данных МТВЗА-ГЯ с КА ведется по радиолиниям сантиметрового (8.2 ГГц) и дециметрового (1.7 ГГц) диапазона.

В процессе распаковки происходит выделение кадров аппаратуры МТВЗА-ГЯ из исходного файла битового потока, основанное на процедуре поиска синхровставок соответствующих структуре кадра СВЧ-радиометра. Контроль достоверности принятых данных основан на процедуре подсчета «контрольной суммы» кадра.

Географическая и временная привязка данных

Для географической привязки данных радиометрических измерений вычисляются географические координаты (широта и долгота) для каждого пикселя рабочего сектора скана. Алгоритм вычислений использует предиктовую модель орбиты для определения координат подспутниковой точки и геометрию сканирования [1].

Схема кругового конического сканирования МТВЗА построена таким образом, что визирование производится в направлении кормы КА «Метеор-М». Направление скана – слева направо с рабочим сектором 105° (от -90° до 15° относительно трассы спутника). Угол визирования составляет 53.3° , а угол падения 65° . В действительности, информация снимается в секторе сканирования 145° , что соответствует 200 пикселям, но из-за влияния подвижных элементов конструкции КА (солнечных батарей), представление данных ограничено сектором 105° , что обеспечивает полосу обзора 1500 км.

За период сканирования 2.5 сек, перемещение нормали спутника составляет 16 км, что сравнимо с элементом пространственного разрешения микроволнового радиометра в каналах 91 ГГц и 183 ГГц. Поэтому масштаб 16 км выбран в качестве пространственного элемента квантования сигнала (для всех каналов СВЧ-радиометра) как вдоль трасы движения спутника, так и вдоль направления сканирования.

Временная привязка информации осуществляется с точностью до 1 мс, что соответствует погрешности в географической привязке вдоль линии сканирования не более 3 км. При угловой погрешности ориентации КА на уровне 0.1° , а также для вариаций высоты орбиты спутника от 819 км до 849 км суммарная ошибка в географической привязке составляет 3-6 км, что является приемлемой величиной для изображений с размером пикселя от 16 км.

Калибровка СВЧ-радиометра МТВЗА-ГЯ

СВЧ-радиометр обеспечивает измерение восходящего радиотеплового излучения системы атмосфера - подстилающая поверхность. Процесс преобразования яркостной температуры в выходной отклик радиометрической системы складывается из формирования с помощью антенны на входе приемника сигнала, интенсивность которого характеризуется антенной температурой, и последующего преобразования этого сигнала в выходное напряжение, величина которого фиксируется регистрирующим устройством [8].

Для интерпретации радиометрических измерений требуется калибровка радиометрической системы, т.е. установление взаимно-однозначного соответствия между её выходными показаниями и яркостной температурой исследуемого элемента пространства.

Калибровка радиометрической системы принципиально может выполняться поэлементно: отдельно антенной системы и радиометрического приемника. Такая процедура целесообразна в тех случаях, когда аппаратура должна работать длительное время без непосредственного участия в процессе измерений человека-оператора, в частности, при автоматически работающей радиометрической аппаратуре, размещаемой на космических носителях [9].

В приборе МТВЗА-ГЯ применена схема радиометра компенсационного типа. Реализация данной схемы в спутниковых сканирующих системах имеет ряд преимуществ по сравнению с модуляционной, поскольку, обеспечивает выигрыш как по габаритно-массовым характеристикам, так и по флюктуационной чувствительности (в два раза). Однако при этом значительную роль начинают играть такие факторы, как нестабильность коэффициента передачи радиометрического тракта. С целью уменьшения её влияния используется внутренняя калибровка шкалы антенных температур.

Внутренняя калибровка. В отличие от оптического диапазона, в микроволновой области спектра не существует национальных стандартов яркости. Калибровка шкалы антенных температур СВЧ-радиометра обеспечивается путем измерения излучения двух опорных сигналов, которые формируются согласованными нагрузками. Для калибровки

СВЧ-радиометра МТВЗА-ГЯ в условиях орбитального полета используются распределенная согласованная нагрузка, которая представляет собой абсолютно чёрное тело (излучательная способность не ниже 0.999) с температурой на уровне 250 К (T_c) и реликтовое излучение космического пространства с яркостной температурой 2.7 К (T_x) [9]. Калибровка проводится на каждом скане и по перепаду уровня излучения между «горячей» и «холодной» нагрузками определяется шкала антенных температур, к которой привязывается информация в рабочем секторе.

Выражение для преобразования выходного сигнала в каждом пикселе рабочего сектора в шкалу антенных температур для i-го радиометрического канала имеет вид

$$T_a^i = \overline{(T_e - T_x)} \frac{(U_c^i - \overline{U_x^i})}{\overline{U_e^i} - \overline{U_x^i}} + T_x, \quad (1)$$

где U_e^i и U_x^i выходной сигнал i-го радиометрического канала при измерении «горячей» и «холодной» нагрузок соответственно. Процедура усреднения $\overline{T_e}$, $\overline{U_x^i}$, $\overline{U_e^i} - \overline{U_x^i}$ производиться по данным измерений на m последовательных сканах (10 < m < 60).

Погрешность измерений физической температуры согласованной нагрузки составляет менее 0.05°C, поэтому указанной ошибкой можно пренебречь. Погрешность, обусловленная пространственным распределением физической температуры согласованной нагрузки в условиях орбитального полета, не превышает 0.2÷0.3 К.

Что касается реликтового излучения космического пространства, то его значение 2.725 К отличается высокой стабильностью, положительные вариации до 8 мК носят пространственный характер и обусловлены радиоизлучением Млечного Пути [9]. В итоге, погрешность измерений излучения космического фона для калибровки СВЧ-радиометра МТВЗА-ГЯ, с учетом переотражений излучения Земли элементами конструкции КА, не превышает 0.5 К.

Таким образом, достигнута абсолютная погрешность калибровки шкалы антенных температур для всех каналов СВЧ-радиометра МТВЗА-ГЯ на уровне = 0.5÷1.2 К.

Абсолютная калибровка. Цель абсолютной калибровки состоит в преобразовании шкалы антенных температур в шкалу яркостных температур, поскольку, антенная температура помимо полезного сигнала, принятого по главному лепестку, включает в себя излучение фона, принятого по боковым и задним лепесткам диаграммы направленности антенны. Абсолютная калибровка СВЧ-радиометра МТВЗА-ГЯ проводилась в период летних испытаний [10].

В орбитальных условиях обеспечивается калибровка всего сквозного тракта СВЧ-радиометра, путем измерений излучения объектов известной яркостной температуры в области главного лепестка диаграммы направленности антенны. В качестве эталонных поверхностей поляризованного излучения использовались акватории Мирового океана при штилевых условиях и безоблачной атмосфере. Тропические леса в районе реки Амазонки, которые характеризуются неполяризованным радиотепловым излучением, представляют собой абсолютно-черное тело в СВЧ-диапазоне [11]. Яркостная температура тестовых полигонов вычислялась на основе радиационной модели системы атмосфера – подстилающая поверхность. Для модельных расчетов были использованы данные радиозондовых и буйковых подспутниковых измерений, которые обеспечиваются международной сетью метеостанций, в том числе островных [10-13].

Преобразование шкалы антенных температур в шкалу яркостных температур производится на основе следующих выражений [10]:

$$T_{\text{яV}}^n = A_1^n T_{aV}^n + B_1^n T_{aH}^n, \quad T_{\text{яH}}^n = A_2^n T_{aH}^n + B_2^n T_{aV}^n. \quad (2)$$

Здесь n – индекс частотного канала, V – вертикальная поляризация, H горизонтальная поляризация, коэффициенты – A_1^n, A_2^n и B_1^n, B_2^n характеризуют, соответственно, уровень боковых лепестков и кросс-поляризационные параметры диаграммы направленности антенны, и определяются по результатам абсолютной калибровки.

Погрешность абсолютной калибровки СВЧ-радиометра МТВЗА-ГЯ составляет величину не более $\pm(3 \div 4)$ К.

Формирование файлов информационных продуктов

На этапе предварительной обработки спутниковых данных СВЧ-радиометра МТВЗА-ГЯ формируются два типа файлов информационных продуктов:

- файлы яркостных температур для отдельных витков;
- файлы глобальных полей яркостных температур.

При формировании файлов яркостных температур реализуется суточный цикл представления информации в виде полувитков от полюса до полюса Земли, которые разделяются на нисходящие (участки орбиты спутника с севера на юг) и восходящие (с юга на север). Один полувиток содержит данные, полученные примерно за 50.7 минуты полета. В сутках содержится 28 или 29 полувитков. Первый и последний полувитки, как правило, не полные, так как файлы включают только данные, относящиеся к одним суткам измерений. Файлы содержат как значения яркостных температур в пикселях, так и данные географических координат пикселей.

Следующими информационными продуктами являются файлы, содержащие глобальные поля яркостных температур. На каждые сутки формируется два файла. Один файл из данных на восходящих витках, другой – на нисходящих витках. Поле представляется собой глобальную прямоугольную сетку с шагом 0.5x0.5 градусов (массив 720x360 элементов). Сетка центрирована по экватору и Гринвичскому меридиану. Значения яркостных температур для каждой ячейки сетки равны средним значениям яркостных температур по всем пикселям, отнесенными к данной ячейке. Примеры глобальных микроволновых изображений для отдельных каналов сканера и зондировщика МТВЗА-ГЯ приведены на Рис.1-3.

После предварительной обработки, данные МТВЗА-ГЯ хранятся в формате HDF (Hierarchical Data Format). Основная область применения указанного формата - обмен научными базами данных.

Заключение

В период опытной эксплуатации спутника «Метеор-М» №1 отработаны алгоритмы и рабочая программа предварительной обработки данных и проведена оценка качества информации СВЧ-радиометра МТВЗА-ГЯ.

Получаемая информация используется в дальнейшем для тематической обработки данных с целью определения геофизических параметров в интересах решения метеорологических и океанографических задач.

В заключение авторы статьи выражают благодарность сотрудникам ИКИ РАН Мазурову А.А. и Матвееву А.М. за помощь в разработке и отладке программно-математического обеспечения.

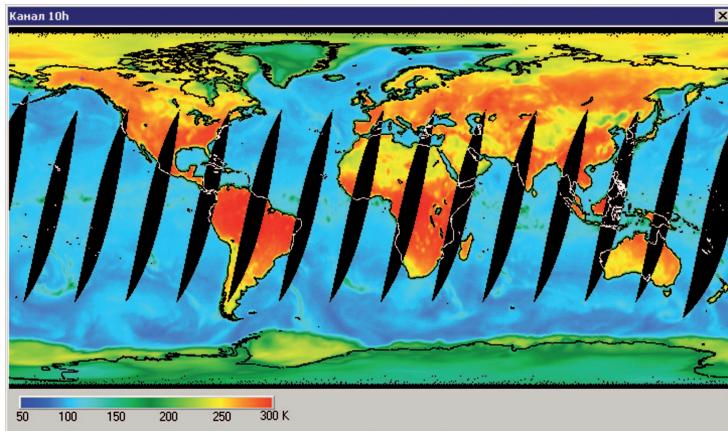


Рис. 1. СВЧ-изображение Земли в канале 10.6 ГГц (ГП) по данным сканера MTBЗА-ГЯ. (КА «Метеор-М» №1, 07 мая 2010г.)

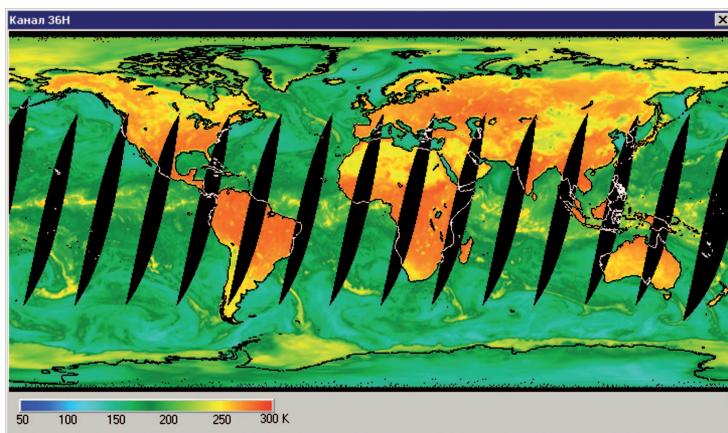


Рис. 2. СВЧ-изображение Земли в канале 36.7 ГГц (ГП) по данным сканера MTBЗА-ГЯ. (КА «Метеор-М» №1, 07 мая 2010г.)

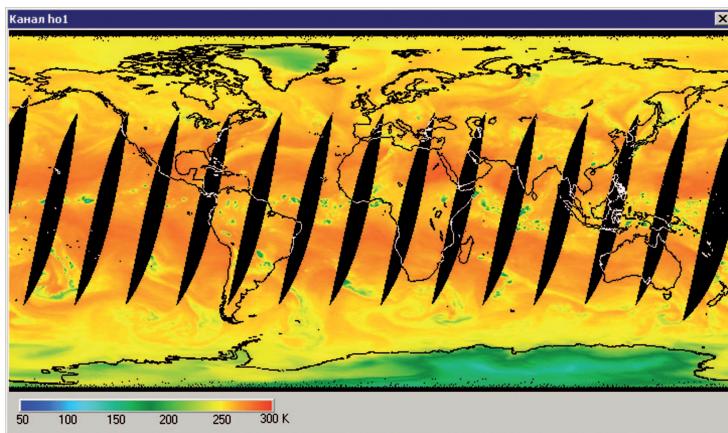


Рис. 3. СВЧ-изображение Земли в канале 183.31±7 ГГц (ГП) по данным зондировщика MTBЗА-ГЯ. (КА «Метеор-М» №1, 07 мая 2010г.)

Литература

1. Болдырев В.В., Горобец Н.Н., Ильгасов П.А., и др. Спутниковый микроволновый сканер/зондировщик MTVZA-ГЯ // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2008. Выпуск 5. Т.1. С.243-248.
2. Заболотских Е.В., Тимофеев Ю.М., Успенский А.Б., и др. О точности микроволновых спутниковых измерений скорости приводного ветра, влагосодержания атмосферы и водозапаса облаков // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана, 2002. Т. 38. № 5. С. 670-675.
3. Гуськов Г.Я., Мусеев С.С., Черный И.В. Вторичные неустойчивости в системе океан-атмосфера и метод микроволновой диагностики природных катастроф // Препринт ИКИ АН СССР, Пр-1762, М., 1991, 34 с.
4. Черный И.В., Чернявский Г.М., Успенский А.Б., Легасов В.М.. СВЧ-радиометр MTVZA спутника "Метеор-3М" №1: предварительные результаты летных испытаний // Исследование Земли из космоса, 2003. №6. С.1-15.
5. Наконечный В.П., Панцов В.Ю., Прохоров Ю.Н., и др. Оптико-микроволновый сканер/зондировщик MTVZA-ОК // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2004. С.139-145.
6. Kleespies T.J., McMillin L.M. The DMSP Special Sensor Microwave Imager/Sounder // Technical Proceedings of Eleventh International ATOVS Study Conference. Budapest, September, 2000.
7. Барсуков И.А., Болдырев В.В., Ильгасов П.А., и др. СВЧ-радиометр MTVZA-ГЯ спутника «Метеор-М» №1 // Труды Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий», Физматлит, Москва, 2009. С.99-107.
8. Есепкина Н.А., Корольков Д.В., Парицкий Ю.Н. Радиотелескопы и радиометры. М.: Наука, 1973. 416с.
9. Кардашев Н.С., Струков И.А. Спутниковый радиоастрономический эксперимент «Реликт». Наука и человечество. М. Знание, 1987, с.173-185.
10. Барсуков И.А., Никитин О.В., Стрельцов А.М, Черный И.В. Калибровка СВЧ-радиометра MTVZA-ГЯ // Космонавтика и приборостроения, 2009. Вып. 1 (58). С.131-137.
11. Brown S.T., Ruf C.S. Determination of an Amazon Hot Reference Target for the On-Orbit Calibration of Microwave Radiometers // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2005. Vol. 22. P.1340-1352.
12. Волосюк В.К., Кравченко В.Ф. Статистическая теория радиотехнических систем дистанционного зондирования и радиолокации. М.: Физматлит, 2008, 704 с.
13. Степаненко В.Д., Г. Г. Щукин, Л. П. Бобылев, С. Ю. Матросов. Радиотеплолокация в метеорологии. Л. Гидрометеоиздат. 1987. 284 с.

Preliminary data processing of microwave radiometer MTVZA-GY based on spacecraft «Meteor-M» №1

I.A. Barsukov, O.V. Nikitin, A.M. Streltsov, I.V. Cherny, G.M. Chernyavsky.

Scientific-Technological Center 'Kosmonit', JSC 'Russian Space Systems
117997 Moscow, 84/32 Profsoyuznaya str.
E-mail: icherny@cpi.space.ru

The following paper describes characteristics and functions of microwave-radiometer MTVZA-GY based on spacecraft «Meteor-M» №1. MTVZA-GY data ground preprocessing are described. This preprocessing consist of: unpacking, geographical and time gridding, radiometric calibration, creation of information products files.

Keywords: Earth remote sensing, meteorology, spacecraft "Meteor-M", satellite radiometer, microwave radiometer MTVZA-GY, radiothermal radiation, antenna temperature, brightness temperature, calibration of microwave radiometer.