

Развитие системы внешней калибровки и валидации данных измерений микроволнового радиометра МТВЗА-ГЯ КА «Метеор-М» № 2

А.Б. Успенский¹, Е.К. Крамчанинова¹, В.С. Косцов², С.А. Успенский¹, И.В. Черный³

¹НИЦ космической гидрометеорологии «Планета», Москва, 123242, Россия

E-mail: uspensky@planet.iitp.ru

²Санкт-Петербургский государственный университет

Санкт-Петербург, 198504, Россия

E-mail: vlad@troll.phys.spbu.ru

³НТЦ «КОСМОНИТ» АО «Российские космические системы»

Москва, 117997, Россия

E-mail: icherny@cpi.space.ru

Представлено описание системы внешней (абсолютной) калибровки и валидации данных микроволнового радиометра МТВЗА-ГЯ (модуль температурного и влажностного зондирования атмосферы), устанавливаемого на полярно-орбитальных метеоспутниках серии «Метеор-М» №2. Бортовая или внутренняя калибровка позволяет представить измерения МТВЗА-ГЯ в терминах антенной температуры T_a , которая, вследствие различных мешающих факторов, может отличаться от яркостной температуры T_y излучающего объекта. Для перехода от T_a к T_y предложено использовать процедуру внешней калибровки, основанную на построении линейной регрессионной зависимости между измеренными T_a и референсными T_y . Референсные значения T_y определяются с помощью высокоточных моделей радиационного переноса для природных полигонов. В расчетах использованы две радиационные модели переноса, адаптированные к данным МТВЗА-ГЯ: европейская модель RTTOV и модель СПбГУ. Исходные данные для расчетов формировались с использованием выходных продуктов зарубежных прогностических центров. Сравнение референсных T_y , полученных с помощью упомянутых радиационных моделей, показало их хорошее количественное соответствие и возможность использования обеих моделей в системе внешней калибровки данных МТВЗА-ГЯ. Приведены результаты внешней калибровки за отдельные периоды 2015–2016 гг.

Ключевые слова: микроволновый сканер/зондировщик, бортовая и внешняя калибровка, антенные и яркостные температуры, модель радиационных расчетов, излучательная способность, данные радиозондирования, численный прогноз погоды

Одобрена к печати: 12.07.2017

DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-4-27-35

Введение

В состав целевой аппаратуры космического аппарата (КА) «Метеор-М» № 2, второго в серии полярно-орбитальных спутников серии «Метеор-М» (Асмус и др., 2014), входит микроволновый сканер/зондировщик МТВЗА-ГЯ (модуль температурного и влажностного зондирования атмосферы). По информационным характеристикам аппаратура МТВЗА-ГЯ близка к зарубежным аналогам — микроволновым радиометрам AMSU-A, AMSU-B (спутники NOAA, США; Metop, ЕС), ATMS (спутник SNPP, США) и SSMIS (спутники DMSP F16-F19, США), см. <http://www.wmo-sat.info/oscar/>.

Описание аппаратуры МТВЗА-ГЯ представлено в статье (Болдырев и др., 2008). Радиометрические каналы МТВЗА-ГЯ имеют рабочие частоты в окнах прозрачности атмосферы 10,6; 18,7; 23,8; 31,5; 36,5; 42; 48 и 91 ГГц (каналы сканера с вертикальной и горизонтальной поляризацией), а также в линиях поглощения кислорода 52–57 ГГц (каналы температурного зондирования — пять с вертикальной и пять с горизонтальной поляризацией) и водяного пара 183 ГГц (три канала влажностного зондирования с вертикальной

поляризацией). Полоса обзора прибора составляет 1500 км, пространственное разрешение — 16–198 км (в зависимости от радиометрического канала), диапазон частот — 10,6–183,3 ГГц; радиометрическая чувствительность должна быть в диапазоне 0,5–1,5 К. По геометрии сканирования (круговое коническое) прибор МТВЗА-ГЯ аналогичен аппаратуре SSMIS/DMSP. Угол визирования составляет 53,3°, угол падения — 65°. Бортовая или внутренняя калибровка радиометрических каналов МТВЗА-ГЯ проводится на каждом скане вне зоны рабочего сектора.

Одна из основных целевых функций МТВЗА-ГЯ — получение «всепогодных» оценок вертикальных профилей температуры $T(p)$ и влажности $q(p)$, где p — давление, на достоверность которых мало влияет облачность в поле зрения прибора. Указанные информационные продукты, а также данные измерений яркостной температуры $T_{я}$ в каналах атмосферного зондирования МТВЗА-ГЯ используются в численном прогнозе погоды (ЧПП) и климатических исследованиях. Согласно оценкам ведущих прогностических центров усвоение данных микроволновых зондировщиков (AMSU-A, AMSU-B, ATMS) в схемах ЧПП дает наибольший вклад, по сравнению с другими спутниковыми данными, в повышение достоверности краткосрочных прогнозов погоды (Bormann, Fouilloux, Bell, 2013). Этим обусловлены высокие требования пользователей к точности измерения яркостной температуры $T_{я}$ с помощью микроволновых зондировщиков.

В период летных испытаний МТВЗА-ГЯ на борту КА «Метеор-М» № 2 была установлена необходимость внешней калибровки данных измерений в каналах сканера и атмосферного зондирования. Результаты разработки процедуры внешней калибровки данных МТВЗА-ГЯ в каналах атмосферного зондирования представлены в статье (Успенский и др., 2016). В настоящей работе рассмотрена процедура внешней калибровки и валидации данных МТВЗА-ГЯ в каналах сканера и зондировщика. Выполнен сравнительный анализ точности двух радиационных моделей. Приводятся результаты внешней калибровки и валидации данных МТВЗА-ГЯ за отдельные периоды 2015–2016 гг.

Метод

Бортовая калибровка радиометрических каналов МТВЗА-ГЯ с целью определения шкалы антенной температуры (АТ или T_a) проводится на каждом периоде сканирования по двухточечной схеме (Барсуков и др., 2010). Бортовая калибровка позволяет представить сигналы, регистрируемые в каналах МТВЗА-ГЯ, в терминах АТ (T_a). Вследствие различных мешающих факторов значения АТ могут отличаться от значений яркостной температуры (ЯТ или $T_{я}$) излучающего объекта. К мешающим факторам и источникам калибровочных погрешностей, согласно (Weng et al., 2013), относятся:

- наличие боковых лепестков в диаграмме направленности антенны (ДНА), через которые может поступать «подсветка», т. е. излучение от элементов конструкции КА и других, «внешних» по отношению к главному лепестку ДНА, источников;

- погрешность задания и возможная изменчивость коэффициента излучения антенны;
- нелинейная зависимость выходного сигнала радиометра от АТ наблюдаемой сцены (в процедуре внутренней калибровки используется линейная зависимость сигнала от АТ);
- кросс-поляризационные эффекты (для сканерных каналов).

Для уменьшения влияния перечисленных мешающих факторов и получения значений ЯТ с приемлемым уровнем погрешности необходима внешняя (абсолютная) калибровка данных измерений МТВЗА-ГЯ. С формальной точки зрения процедуры внешней и внутренней калибровки близки, а именно устанавливается линейная регрессионная связь между искомой яркостной температурой $T_{\text{я}}$ и измеренной антенной температурой $T_{\text{а}}$ в каждом i -м канале:

$$T_{\text{я}}^i = c_1^i T_{\text{а}}^i + c_2^i. \quad (1)$$

Оценки калибровочных коэффициентов c_1^i, c_2^i строятся методом наименьших квадратов по обучающей выборке пространственно-совмещенных и синхронных пар $\{T_{\text{я}}^i(j), T_{\text{а}}^i(j)\}$, где j — номер реализации, $j = 1, 2, \dots, n$. Обучающая выборка формируется для набора n пикселей (покрывающих заранее отобранные тестовые участки или природные полигоны), для которых имеются эталонные (референсные) значения $T_{\text{я}}$. Это могут быть измерения $T_{\text{я}}^i$ аналогов аппаратуры МТВЗА-ГЯ, имеющих высокоточную абсолютную калибровку, или результаты радиационного моделирования. Учитывая отсутствие полноценных аналогов аппаратуры МТВЗА-ГЯ (по составу радиометрических каналов и геометрии сканирования), в качестве референсных используются результаты модельных расчетов ЯТ.

Радиационная модель

Для расчета референсных $T_{\text{я}}^i(j)$ обычно используют радиационные модели переноса (РМП) (в англоязычной литературе Radiative Transfer Model, или RTM) двух типов: так называемые быстрые модели типа RTTOV (Saunders, Matricardi, Brunel, 1999), адаптированные к различным спутниковым микроволновым радиометрам, и модели, основанные на точных полинейных расчетах. В данной работе используется РМП, созданная в СПбГУ и представляющая модернизированный вариант радиационной модели из (Образцов, Щукин, 2006).

Применительно к микроволновому излучению поверхности водоемов существуют достаточно точные параметрические модели расчета коэффициента излучения $\varepsilon(f)$, где f — частота, входными данными для которых являются температура T_s поверхности, скорость приводного ветра v и соленость воды s . На основе подобных моделей разработан

программный комплекс FASTEM (FAST Emissivity Model), входящий в RTM RTTOV (<http://nwpsaf.eu>) и позволяющий рассчитывать $\epsilon(f)$ с приемлемой точностью. В РМП СПбГУ также используется блок FASTEM, заимствованный из RTM RTTOV.

Гораздо сложнее обстоит дело с описанием микроволнового излучения (излучательных свойств) ледовых и земных покровов. На практике вместо экспериментальных или модельных значений используют оценки $\epsilon(f)$, полученные по измерениям спутниковых микроволновых радиометров, причем для уменьшения зависимости $\epsilon(f)$ от T_s вместо «мгновенных» используют среднемесячные оценки $\epsilon(f)$. Для определения $\epsilon(f)$ используются радиационные расчеты (уравнение переноса излучения), для которых должны быть заданы $T(p)$, $q(p)$ и T_s , см., напр., (Karbou et al., 2005).

В РМП СПбГУ и в RTM RTTOV предусмотрен ввод значений $\epsilon(f)$ для разных типов поверхности суши из атласа AER Global Gridded AMSR-E Emissivity Atlas, сформированного по информации микроволнового радиометра AMSR-E и содержащего среднемесячные значения $\epsilon(f)$ в каналах 10,7; 18,7; 23,8; 36,5 и 89,0 ГГц на вертикальной и горизонтальной поляризациях. Возможно также использовать оценки $\epsilon(f)$ для сканерных каналов, полученные Ф. Карбу (F. Karbou) по данным радиометра SSMIS/DMSP, см. сайт <ftp://ftp-cnrm.meteo.fr/>.

Отметим, что с помощью описанных моделей можно, наряду с T_a , рассчитывать функции пропускания и функциональные производные T_a (весовые функции) по температуре, влажности и другим параметрам.

Подготовка входных данных

Формирование выборки $\{T_a^i(j), T_s^i(j)\}$, включает проведение массовых расчетов референсных $T_a^i(j)$ для тестовых участков и природных полигонов. Входными данными для расчетов $T_a^i(j)$ в каждом j -м пункте зондирования являются вертикальные профили температуры $T(p)$ и влажности $q(p)$, заданные на сетке давлений $\{p_k\}$, а также T_s и $\epsilon(f)$.

Требования к точности задания $\epsilon(f)$ и других входных данных меняются в зависимости от того, какой относительный вклад в измеряемый сигнал вносит уходящее излучение подстилающей поверхности и атмосферы. Для внешней калибровки данных в каналах сканера необходимо иметь в виду рекомендации авторов статьи (Митник, Митник, 2016). Требования к входным данным для моделирования ЯТ в каналах атмосферного зондирования достаточно подробно рассмотрены в работе (Успенский и др., 2016).

Наивысший приоритет при выборе подходящих профилей $T(p)$, $q(p)$ для радиационных расчетов имеют данные радиозондирования. Недостатком этих данных является ограниченная высота подъема радиозондов (давление до 10 гПа), что не позволяет моделировать измерения МТВЗА-ГЯ в «стратосферных» температурных каналах.

Преимущество использования в качестве входных данных выходных продуктов ЧПП, производимых, например, с помощью прогностической системы GFS NCEP и находящихся-

ся в открытом доступе (<http://www.emc.ncsr.noaa.gov/>), состоит в том, что численный анализ метеорологических полей (или прогноз с нулевой заблаговременностью) производится четыре раза в сутки на регулярной широтно-долготной сетке $0,5 \times 0,5^\circ$ (26 изобарических уровней в слое от поверхности до 10 гПа). Это позволяет накапливать представительные выборки пар $\{T_{\text{яизм}}^i, T_{\text{ярасч}}^i\}$ и является более «технологичным» в реализации, ср. (Weng et al., 2013).

Формирование выборок для сравнения точности моделирования ЯТ с помощью РМП СПБГУ ($T_{\text{я(СПБГУ)}}^i$) и RTM RTTOV ($T_{\text{я(RTTOV)}}^i$), а также обучающих выборок для расчета калибровочных коэффициентов c_1^i, c_2^i , производилось для природных полигонов — акваторий Тихого, Атлантического и Индийского океанов в широтном поясе от 60° с. ш. до 60° ю. ш. Данные МТВЗА-ГЯ при этом подвергаются фильтрации: сцены с плотной облачностью и осадками детектируются и удаляются согласно пороговому критерию — количество жидко-капельной воды в облаках (LWP) не должно превышать $0,05 \text{ кг/м}^2$; удаляются сцены со скоростью приводного ветра больше 7 м/с ; удаляются измерения $T_{\text{я}}^i(j)$, не попадающие в диапазон $T_{\text{а ср}}^i \pm 2\sigma$, где $T_{\text{а ср}}^i$ — среднее, σ — стандартное отклонение. Для реализации порогового критерия детектирования облачных сцен используются прогностические оценки LWP на регулярной сетке $0,5 \times 0,5^\circ$ (продукт GFS NCEP). Как показали численные эксперименты, при формировании выборок $T_{\text{а}}^i$ из массива данных измерений МТВЗА-ГЯ (полусуточный набор витков, $\sim 500\,000$ пикселей) потери за счет всех перечисленных типов фильтрации составляют в среднем 77% (из них $\sim 30\%$ — облачные сцены; 30% — сцены с сильным приводным ветром; 17% — измерения АТ, заметно отличающиеся от $T_{\text{а ср}}^i$).

Результаты

Достоверность результатов внешней калибровки данных МТВЗА-ГЯ с помощью процедуры (1) зависит главным образом от точности радиационного моделирования референсных ЯТ. Как отмечено выше, для радиационных расчетов применялись два программных комплекса — РМП СПБГУ и RTM RTTOV (v. 11.1). Точность моделирования ЯТ, измеряемых радиометром МТВЗА-ГЯ, была оценена разработчиками RTM RTTOV сравнением с результатами полинейных расчетов. На материале зависимой выборки входных данных установлено, что среднеквадратичная ошибка (СКО) во всех каналах не превышает $0,05 \text{ К}$, а систематическое смещение δ — не более $0,03 \text{ К}$. Это позволяет использовать результаты расчетов с помощью RTM RTTOV (v. 11.1) в качестве эталона при оценке погрешностей моделирования с помощью РМП СПБГУ.

Сравнительный анализ смоделированных $T_{\text{я(СПБГУ)}}^i$ и $T_{\text{я(RTTOV)}}^i$ был выполнен на данных за 7 августа 2015 г. При расчетах все данные были приведены к сетке продуктов GFS NCEP (в расчетах и сравнениях использовались данные, координаты которых отличались от узлов сетки $0,5 \times 0,5^\circ$ не более чем на $0,05^\circ$). Моделирование выполнялось для стандартных синоптических сроков 00:00, 06:00, 12:00 и 18:00 ВСВ (всемирное скоординированное

время), сравнения выполнялись с измерениями МТВЗА-ГЯ, отстоящими от указанных сроков не более чем на 90 мин.

Сравнение смоделированных $T_{я(СПБГУ)}$ и $T_{я(RTTOV)}$ показало, что для каналов зондировщика величины δ и СКО не превышают 0,5 К, а для каналов сканера — 1,8 и 2,8 К соответственно. Расчеты калибровочных коэффициентов c_1^i, c_2^i с использованием РМП СПБГУ дают величины c_1^i в пределах 0,6–1,3, а c_2^i — в пределах от –47 до 109. Аналогичные расчеты с использованием RTM RTTOV показали расхождения в величинах c_1^i, c_2^i не более 2% и 5% от среднего значения параметра соответственно. Полученные результаты свидетельствуют о взаимозаменяемости моделей в процедуре внешней калибровки данных МТВЗА-ГЯ.

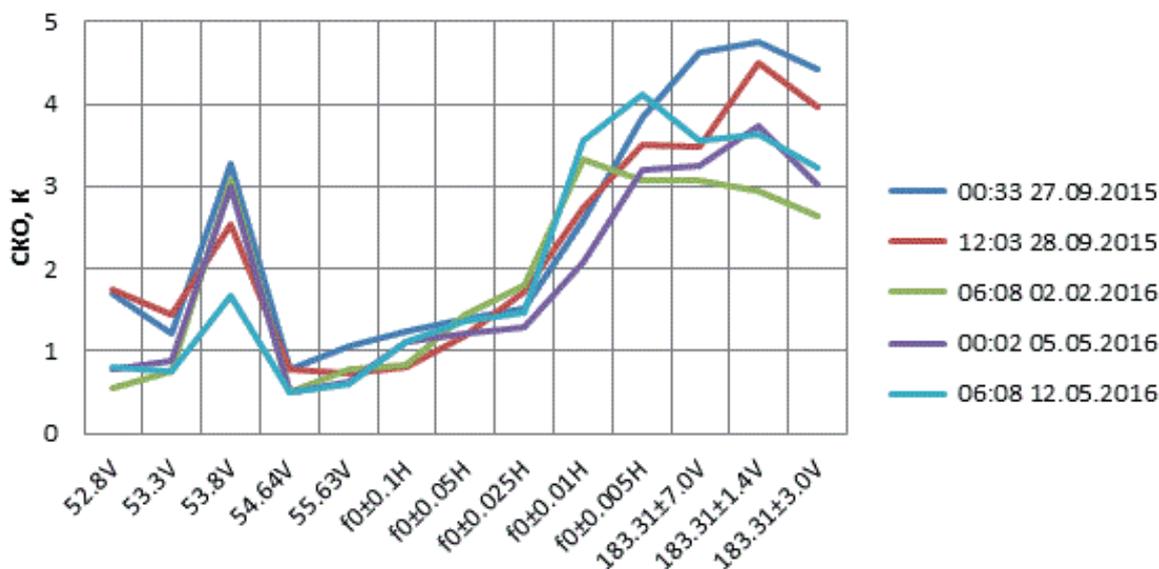


Рис. 1. Среднеквадратические отклонения (СКО) измеренных $T_{я}$ от моделированных $T_{я}$ в каналах атмосферного зондирования за различные сроки 2015–2016 гг.

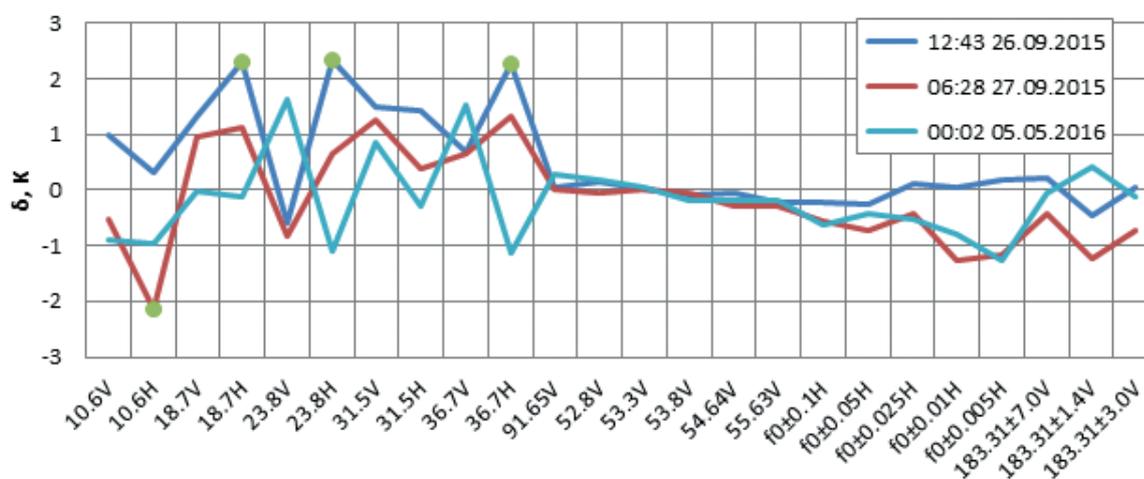


Рис. 2. Систематические смещения δ измеренных $T_{я}$ от моделированных $T_{я}$ за различные сроки 2015–2016 гг.

Некоторые результаты применения процедуры внешней калибровки к данным МТВЗА-ГЯ представлены на рис. 1 и 2 (обозначения: $f_0 = 57,290344 \pm 0,3222$ ГГц; V — вер-

тикальная, Н — горизонтальная поляризация; время указано в системе ВСВ). Согласованный ход кривых СКО на *рис. 1* и смещения δ на *рис. 2* свидетельствует о стабильности точностных характеристик внешней калибровки измерений МТВЗА-ГЯ на протяжении длительного времени (порядка девяти месяцев). Сравнение измеренных и моделированных величин T_y в каналах атмосферного зондирования (*рис. 2*) свидетельствует о приемлемой точности внешней калибровки: для большинства каналов δ не превышает 1,5 К, за исключением температурных «стратосферных» каналов и каналов влажностного зондирования. Повышенный уровень погрешности для «стратосферных» каналов может быть обусловлен недостаточной адекватностью данных GFS NCEP в стратосфере и свидетельствует о необходимости привлечения более адекватных входных данных, например, данных радиопросвечивания, см. (Zou, Lin, Weng, 2013). Повышенные значения δ в каналах влажностного зондирования, по-видимому, вызваны ухудшением точности генерирования референсных T_y из-за недостаточной для данной задачи точности прогностических профилей $q(p)$. Следует отметить также, что максимальная погрешность в каналах сканера приходится на каналы с горизонтальной поляризацией. Значения δ , превышающие 2 К, отмечены на *рис. 2* зелеными точками. Процедура (1) не позволяет достигнуть приемлемой точности внешней калибровки для сканерных каналов с горизонтальной поляризацией (сравнимой с точностью калибровки каналов температурного зондирования). Попытка использовать вместо (1) регрессию T_y^i на T_{yV}^i и T_{yH}^i не привела к заметному улучшению результата. Замена линейной регрессии на нелинейную также оказалась неэффективной.

Выводы

Полученные результаты можно суммировать следующим образом:

1. Разработана и введена в опытную эксплуатацию процедура внешней калибровки данных МТВЗА-ГЯ, обеспечивающая приемлемую точность измеряемых T_y в каналах атмосферного зондирования.
2. Требуется продолжение работ по повышению точности внешней калибровки измерений МТВЗА-ГЯ в «стратосферных» температурных каналах и каналах влажностного зондирования. Кроме того, необходима дальнейшая отработка процедур калибровки в каналах сканера.

Авторы выражают благодарность П. Рэйер (P. Rayet) из NWPSAF (Eumetsat) за адаптацию RTM RTTOV к данным МТВЗА-ГЯ, С. Инглиш (S. English) из ECMWF (Европейский центр среднесрочных прогнозов погоды) за участие в анализе качества калиброванных данных МТВЗА-ГЯ и полезные советы, а также Ф. Карбу (F. Karbou) из CNRF (Метеослужба Франции) за предоставленные данные об излучательной способности земных покровов.

Литература

1. Асмус В.В., Загребаев В.А., Макриденко Л.А., Милехин О.Е., Соловьев В.И., Успенский А.Б., Фролов А.В., Хайлов М.Н. Система полярно-орбитальных метеорологических спутников серии «Метеор-М» // Метеорология и гидрология. 2014. № 6. С. 5–16.
2. 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.
3. Болдырев В.В., Горобец Н.Н., Ильгасов П.А., Никитин О.В., Панцов В.Ю., Прохоров Ю.Н., Стрельников Н.И., Стрельцов А.М., Черный И.В., Чернявский Г.М., Яковлев В.В. Микроволновый сканер/зондировщик МТВЗА-ГЯ КА «Метеор-М» № 1 // Вопросы электромеханики. 2008. Т. 107. С. 22–25.
4. Митник Л.М., Митник М.Л. Калибровка и валидация — необходимые составляющие микроволновых радиометрических измерений со спутников серии «Метеор-М» № 2 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 1. С. 95–104.
5. Образцов С.П., Щукин Г.Г. Определение температурно-влажностных характеристик атмосферы и подстилающей поверхности по данным спутниковых СВЧ-радиометрических измерений // Ученые записки № 3. Научно-теор. журн. СПб: РГГМУ, 2006. С. 28–45.
6. Успенский А.Б., Козлов А.А., Крамчанинова Е.К., Черный И.В., Чернявский Г.М. Абсолютная калибровка каналов атмосферного зондирования спутникового микроволнового радиометра МТВЗА-ГЯ // Исследование Земли из космоса. 2016. № 5. С. 57–70.
7. Bormann N., Fouilloux A., Bell W. Evaluation and assimilation of ATMS data in the ECMWF system // J. Geophys. Res. Atmos. 2013. Vol. 118. P. 12 970–12 980.
8. Karbou F., Prigent C., Eymard L., Pardo J. Microwave land emissivity calculations using AMSU-A and AMSU-B measurements // IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing. 2005. Vol. 43. No. 5. P. 948–959.
9. Saunders R.W., Matricardi M., Brunel P. An improved fast Radiative transfer model for assimilation of satellite radiance observations // Q.J.R. Meteorol. Soc. 1999. Vol. 125. P. 1407–1425.
10. Weng F., Zou X., Sun N., Yang H., Tian M., Blackwell W., Wang X., Lin L., Anderson K. Calibration of Suomi National Polar-Orbiting Partnership (NPP) Advanced Technology Microwave Sounder (ATMS) // J. Geophys. Res. Atmos. 2013. Vol. 118. P. 1–14.
11. Zou X., Lin L., Weng F. Absolute Calibration of ATMS Upper Level Temperature Sounding Channels Using GPS RO Observations // IEEE Trans. Microw. Theory Tech. 2013. Vol. 44. No. 8. P. 1460–1469.

Development of the calibration/validation system for microwave radiometer MTVZA-GYa observations from Meteor-M No. 2 satellite

A.B. Uspensky¹, E.K. Kramchaninova¹, V.S. Koscov², S.A. Uspensky¹, I.V. Cherny³

¹*SRC Planeta, Moscow 123242, Russia*

E-mail: uspensky@planet.iitp.ru

²*Saint Petersburg State University, Saint Petersburg 198504, Russia*

E-mail: vlad@troll.phys.spbu.ru

³*STC Kosmonit, Moscow 117997, Russia*

E-mail: icherny@cpi.space.ru

The system of post-launch absolute calibration and validation has been developed for observations of microwave radiometer MTVZA-GYa (module for temperature and humidity sounding of the atmosphere) onboard Meteor-M No. 2 satellite. An onboard calibration technique is used for converting the signals from MTVZA-GYa to antenna temperatures T_a . Due to various error sources the T_a values can differ from calibrated sensor brightness temperatures T_b . To derive T_b from T_a the regression methods are applied and the modeled brightness temperatures are used as reference data. The modeled brightness temperatures are calculated using two radiative transfer models (RTM) — RTM RTTOV and RTM SPbSU. The NWP products are used as input to RTM calculations. Comparison of T_b values calculated with both RTMs shows the consistency of modeling results and the ability of using them in cal/val system for MTVZA-GYa data. The results of post-launch absolute calibration of MTVZA-GYa observations in imaging/sounding channels are presented for some days in 2015.

Keywords: microwave imager/sounder, onboard and post-launch calibration, antenna and sensor brightness temperatures, radiative transfer model, emissivity, radiosonde data, numerical weather prediction

Accepted: 12.07.2017

DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-4-27-35

References

1. Asmus V.V., Zagrebaev V.A., Makridenko L.A., Milekhin O.E., Solov'ev V.I., Uspenskii A.B., Frolov A.V., Khailov M.N., Sistema polarno-orbital'nykh meteorologicheskikh sputnikov serii Meteor-M (The system of polar orbiting meteorological satellites Meteor-M), *Meteorologiya i gidrologiya*, 2014, No. 6, pp. 5–16.
2. Barsukov I.A., Nikitin O.V., Strel'tsov A.M., Chernyi I.V., Kalibrovka SVCh-radiometra MTVZA-GYa (Calibration of microwave radiometer MTVZA-GYa), *Kosmonavtika i raketostroenie*, 2010, Issue 1(58), pp. 131–137.
3. Boldyrev V.V., Gorobets N.N., Il'gasov P.A., Nikitin O.V., Pantsov V.Yu., Prokhorov Yu.N., Strel'nikov N.I., Strel'tsov A.M., Chernyi I.V., Chernyavskii G.M., Yakovlev V.V., Mikrovolnovyi skaner/zondirovshchik MTVZA-GYa KA Meteor-M No. 1 (Microwave scanner/atmospheric sounder MTVZA-GYa on Meteor-M No. 1 spacecraft), *Voprosy elektromekhaniki*, 2008, Vol. 107, pp. 22–25.
4. Mitnik L.M., Mitnik M.L., Kalibrovka i validatsiya — neobkhodimye sostavlyayushchie mikrovolnovykh radiometricheskikh izmerenii so sputnikov serii Meteor-M No. 2 (Calibration and validation — essential components of microwave radiometric measurements from satellites of the series Meteor-M No. 2), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, Vol. 13, No. 1, pp. 95–104.
5. Obratsov S.P., Shchukin G.G., Opredelenie temperaturno-vlazhnostnykh kharakteristik atmosfery i podstilayushchei poverkhnosti po dannym sputnikovykh svch-radiometricheskikh izmerenii (Determination of temperature-humidity characteristics of the atmosphere and underlying surface from data of satellite microwave radiometric measurements), *Uchenye zapiski No. 3. Nauchno-teoreticheskii zhurnal*, Saint-Petersburg: RGGMU, 2006, pp. 28–45.
6. Uspenskii A.B., Kozlov A.A., Kramchaninova E.K., Chernyi I.V., Chernyavskii G.M., Absolyutnaya kalibrovka kanalov atmosfernogo zondirovaniya sputnikovogo mikrovolnovogo radiometra MTVZA-GYa (Absolute calibration of atmospheric sounding channels for satellite microwave radiometer MTVZA-GYa), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2016, No. 4.
7. Bormann N., Fouilloux A., Bell W., Evaluation and assimilation of ATMS data in the ECMWF system, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 2013, Vol. 118, pp. 12970–12980.
8. Karbou F., Prigent C., Eymard L., Pardo J., Microwave land emissivity calculations using AMSU-A and AMSU-B measurements, *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 2005, Vol. 43, No. 5, pp. 948–959.
9. Saunders R.W., Matricardi M., Brunel P., An improved fast Radiative transfer model for assimilation of satellite radiance observations, *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 1999, Vol. 125, pp. 1407–1425.
10. Weng F., Zou X., Sun N., Yang H., Tian M., Blackwell W., Wang X., Lin L., Anderson K., Calibration of Suomi National Polar-Orbiting Partnership (NPP) Advanced Technology Microwave Sounder (ATMS), *J. Geophys. Res. Atmos.*, 2013, Vol. 118, pp. 1–14.
11. Zou X., Lin L., Weng F., Absolute Calibration of ATMS Upper Level Temperature Sounding Channels Using GPS RO Observations, *IEEE Trans. Microw. Theory Tech*, 2013, Vol. 44, No. 8, pp. 1460–1469.