

К вопросу проведения внешней калибровки спутникового радиометра при отсутствии опорной «горячей» области

Д.С. Сазонов, И.Н. Садовский, А.В. Кузьмин

*Институт космических исследований Российской академии наук
117997, г. Москва, ул. Профсоюзная, 84/32.
E-mail: sazonov_33m7@mail.ru*

В работе показана модифицированная методика проведения внешней калибровки спутникового радиометра. В основе модернизации методики лежит моделирование радиоизлучения системы океан-атмосфера при различных ее состояниях. Полученная линейная корреляция между моделью и измерениями позволяет получить калибровочную прямую в диапазоне радиоярких температур соответствующих измерениям над водной поверхностью и, за счет линейности передаточной функции радиометра, продлить ее в область температур соответствующих измерениям над сушей. Работоспособность предлагаемого подхода проверена на данных прибора SSMIS F18. Результаты показали практически идеальное совпадение модельных расчетов с радиояркими температурами SSMIS. Линейность аппроксимации и малый уровень ошибки при ее продлении в «горячую» область позволяют выполнить калибровку прибора без использования опорной «горячей» точки.
Ключевые слова: Радиометрическая калибровка, MTVZA, моделирование, перенос излучения, модель диэлектрической проницаемости

On the issue of external calibration of a satellite radiometer in the absence of a reference “hot” region

D.S. Sazonov, I.N. Sadovsky, A.V. Kuzmin

*Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences
Profsoyuznaya street, 84/32, Moscow, 117997, Russia*

This paper presents a modified methodology for external calibration of a satellite radiometer. The modernized methodology is based on modeling the radio emission of the ocean-atmosphere system under various conditions. The resulting linear correlation between the model and measurements allows for a calibration curve to be obtained in the range of brightness temperatures corresponding to measurements over the water surface and, due to the linearity of the radiometer's transfer function, extended it to the temperature range corresponding to measurements over land. The proposed approach was validated using data from the SSMIS F18 instrument. The results demonstrated near-perfect agreement between the model calculations and the SSMIS brightness temperatures. The linearity of the approximation and the low error level when extending it into the "hot" region allow for instrument calibration without the use of a reference "hot" area.
Keywords: Radiometric calibration, MTVZA, modeling, radiation transfer, permittivity model

Введение

Дистанционное зондирование земли из космоса в микроволновом диапазоне длин электромагнитных волн зарекомендовало себя как мощный инструмент глобального мониторинга и ретроспективного изучения климатических процессов. Микроволновое зондирование, как активное, так и пассивное позволяет получать информацию о характеристиках атмосферы и подстилающей поверхности вне зависимости от времени суток и при любых погодных условиях.

К наиболее известным спутниковым радиометрам относятся ATMS (Advanced Technology Microwave Sounder), MWRI-1 (Micro-Wave Radiation Imager 1), SSMIS (Special Sensor Microwave - Imager/Sounder), AMSR-2 (Advanced Microwave Scanning Radiometer) и TMI (Tropical Rainfall Measuring Mission Microwave Imager) [1, 2, 3, 4]. Среди отечественных, есть серия приборов МТВЗА (Модуль Температурного и Влажностного Зондирования Атмосферы), которые запускались на КА "Метеор-М" № 1,2,3,4 (с 2009 по 2024гг) [5, 6].

Одним из важных этапов предобработки данных, поступающих со спутника, является внутренняя (антенная) и внешняя (радиометрическая) калибровка. Методика внутренней и внешней калибровки для прибора МТВЗА-ГЯ описана в работе [6]. В указанной методике для расчета радиояркостной температуры для «горячей» опорной области, например, для лесов Амазонки используются коэффициенты излучений, такие же, как для прибора SSMIS, предполагая, что излучение практически не зависит от угла наблюдения. В идеальном случае, необходимо провести натурные многочастотные измерения коэффициента излучения суши на угле в 65 градусов, однако таких измерений нет. Таким образом, в настоящее время нет достаточно точного способа внешней калибровки прибора МТВЗА-ГЯ.

Выходом из этой ситуации может быть использование моделей переноса излучения (МПИ) для расчета излучения системы «океан-атмосфера» при различных ее температурах в условиях отсутствия ветра (волнения), а также при различных условиях свободной от осадков и жидкокапельной влаги атмосферы. В этом случае модельные значения должны иметь корреляцию с измеренными прибором радиояркостями и выстраиваться в прямую линию, которую можно будет использовать в качестве калибровочной.

Таким образом, в настоящей работе рассматривается модифицированная методика внешней калибровки, основанная на работе [6]. Анализ предложенного подхода предлагается выполнять на данных SSMIS, т.к. этот прибор откалиброван. Проверяется предположение, что на основе сравнения модельных расчетов и измеренных данных прибора SSMIS можно построить калибровочную прямую, продлить ее в область высоких температур, соответствующих излучению системы «земная поверхность-атмосфера», и, провести оценку ошибки экстраполяции полученной калибровочной прямой для «горячей» области лесов Амазонки.

Внешняя калибровка

Для выполнения модельных расчетов будет использоваться соотношение формирования и переноса излучения в системе «подстилающая поверхность – атмосфера», которое, в соответствии с методикой [6], записывается в следующем виде:

$$T_{Br}^{V,H}(\nu, \theta) = \chi^{V,H}(\nu, \theta) T_0 e^{-\tau(\nu) \sec(\theta)} + T_{Br}^{\uparrow}(\nu, \theta) + T_{Br}^{\downarrow}(\nu, \theta) [1 - \chi^{V,H}(\nu, \theta)] e^{-\tau(\nu) \sec(\theta)} + T_{cold} [1 - \chi^{V,H}(\nu, \theta)] e^{-2\tau(\nu) \sec(\theta)}, \quad (1)$$

где: $T_{Br}^{V,H}(\nu, \theta)$ – яркостная температура системы «подстилающая поверхность – атмосфера» на вертикальной (V) или горизонтальной (H) поляризации принимаемого излучения с частотой ν и углом встречи с Землей θ , регистрируемая прибором на орбите;

$\chi^{V,H}(\nu, \theta)$ – коэффициент излучения подстилающей поверхности;

T_0 – термодинамическая температура поверхности в градусах Кельвина;

$\tau(\nu)$ – интегральное поглощение в атмосфере;

$T_{Br}^{\uparrow}(\nu, \theta)$ и $T_{Br}^{\downarrow}(\nu, \theta)$ – яркостная температура восходящего и нисходящего излучения атмосферы соответственно;

T_{cold} – яркостная температура космического излучения;

Представленная МПИ используется для калибровки радиометрических каналов МТВ3А-ГЯ путём сопоставления результатов измерений с расчётными значениями $T_{Br}^{v,H}(v, \theta)$. При этом для выполнения модельных оценок влияния атмосферы при расчёте $\tau(v)$, $T_{Br}^{\uparrow}(v, \theta)$ и $T_{Br}^{\downarrow}(v, \theta)$ используются вертикальные профили давления, температуры и влажности атмосферы (что позволяет учесть влияние полос поглощения основных составляющих атмосферы), водности облаков и интенсивности осадков для каждого элемента наблюдения прибора. Расчёт $\chi^{v,H}(v, \theta)$ для участков поверхности океана основан на априорном знании температуры поверхности, солёности водной среды, интенсивности волнения (в том числе через скорость и направление приводного ветра), которые могут быть взяты из реанализа. Для участков суши, помимо температуры поверхности, важно знать коэффициент излучения почвы/растительности.

Внешняя калибровка основана на сопоставлении измеренной антенной температуры и расчётной яркостной температуры над протяжёнными однородными «холодными» и «горячими» участками океана и земной поверхности. В качестве «холодных» участков выбираются области, где значения $T_{Br}(v)$ минимальны, такие области отмечаются над районами океана с температурой поверхности воды $T_0 \leq 12^\circ\text{C}$, слабым ветром (менее 2-3 м/с), отсутствием облаков и низкими значениями паросодержания атмосферы [7,8]. Для получения «горячей» калибровочной точки, выбираются области, где значения $T_{Br}(v)$ максимальны, это дождевые широколиственные леса бассейна Амазонки.

В исходной методике [6], радиояркостные температуры $T_{Br}^{v,H}(v, \theta)$ на частотах МТВ3А-ГЯ рассчитываются путем численного интегрирования МПИ. Для расчета излучения атмосферы использованы уточнённые спектры поглощения в кислороде и в водяном паре [9], диэлектрическая проницаемость пресной и солёной воды рассчитывалась на основе работы [10], а влияние ветра на коэффициенты излучения океана оценивалось по эмпирическим зависимостям [12]. При моделировании $T_{Br}^{v,H}(v, \theta)$ над Амазонкой, другими типами земных покровов, морскими и материковыми льдами использовались эмпирические данные о коэффициентах излучения [12, 13, 14, 15].

В настоящей работе для калибровки предлагается выполнить аналогичный расчет, однако, со следующими изменениями. Во-первых, для расчета $T_{Br}^{\uparrow}(v, \theta)$ и $T_{Br}^{\downarrow}(v, \theta)$ используется модель [16] поглощения в кислороде и в водяном паре, входными данными для расчета выступают профили температуры и влажности из реанализа *Climate Data Store ECMWF reanalysis* (<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/home>) ERA5 [17]. Во-вторых, расчет диэлектрической проницаемости выполнить по модели FAST microwave Emissivity Model часть модели (FASTEM-6) [18]. Входными параметрами являются T_0 , взятая из реанализа ERA5, солёность установлена как типовое значение 35‰. В-третьих, в расчете и сравнении участвуют все данные, зафиксированные при любых T_0 и значениях паросодержания, скоростях ветра менее 3 м/с, при отсутствии осадков и при минимальных значениях жидкокапельной влаги менее 0,01 кг/м².

В указанной методике предполагается, что корреляция между рассчитанными по МПИ (1) $T_{Br}^{v,H}(v, \theta)$ будет линейной и перекроет практически половину диапазона возможных значений яркости, тем самым обеспечит получение калибровочной прямой. Опорная «горячая» точка в данной методике используется для оценки ошибок, которые

могут возникнуть при продлении калибровочной прямой в область высоких значений температур поверхности суши.

Для проверки работоспособности методики были проведены расчеты на калиброванных данных радиояркостных температур прибора SSMIS (DMSP F18). Набор данных был взят с ресурса (<https://www.ncei.noaa.gov/has/HAS.DsSelect>). Расчет выполнен только для частот 19,35, 22,235, 37,0 и 91,655 ГГц, т.к. только для этих частот есть значения излучательной способности лесов Амазонки [15]. На рис.1 приведен модельный расчет радиояростной температуры системы «океан-атмосфера» в сравнении с калиброванными измерениями прибора SSMIS. Результаты расчета приведены для частот 19,35, 22,235, 37,0 и 91,655 ГГц для вертикальной (а) и горизонтальной (б) поляризаций. Линиями на графиках представлена линейная аппроксимация по точкам измерения-расчет, которые продлены до значений «горячей» точки (отмечены звездочками на графике). Для всех проанализированных частотных каналов величина корреляции более 0,99, а набор сравниваемых значений выстраивается в прямую линию (с небольшим отклонением для частоты 91,65 ГГц) вдоль диагонали диаграммы рассеяния. Это значит, что модельные расчеты точно повторяют результаты измерений.

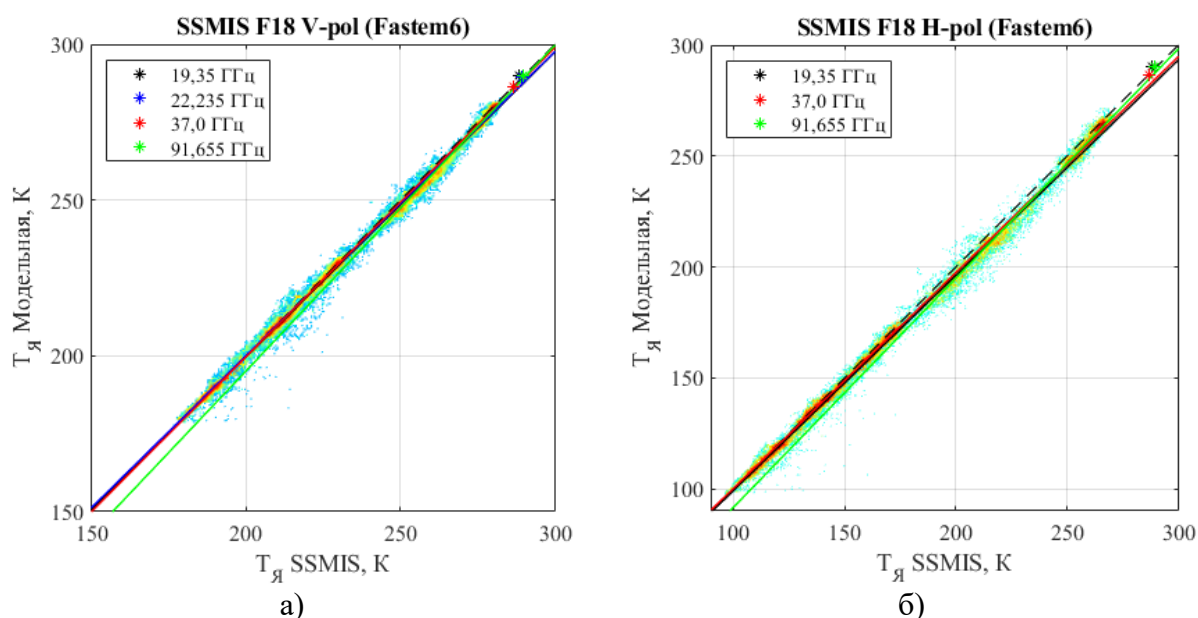


Рис. 1. Диаграммы рассеяния с линиями аппроксимаций и значениями горячих областей для прибора SSMIS F18 (вертикальный угол наблюдения 53°). Данные за 8 июня 2020 года

На основе полученных результатов была проведена оценка ошибки экстраполяции полученных калибровочных прямых для «горячей» области лесов Амазонки. Ошибки вычислялись как разница, между измеренными значениями для «горячей» области и экстраполированным. Все ошибки имеют положительное значение, значит, аппроксимация несколько недооценивает измеренные радиояркостности. Наибольшие ошибки соответствуют случаю горизонтальной поляризации (порядка 8K для частоты 19,35 ГГц) и уменьшаются по мере роста частоты. Для вертикальной поляризации наблюдается аналогичная частотная зависимость уровня ошибки, только с меньшим уровнем (1÷4K, для разных частот).

Заключение

В представленной работе показана модифицированная методика проведения внешней калибровки. Работоспособность предлагаемого подхода проверена на данных прибора SSMIS F18. Результаты показали практически идеальное совпадение модельных расчетов с радиояркими температурами SSMIS. Линейность аппроксимации по точкам модель-измерения и малый уровень ошибки при ее продлении в «горячую» область позволяют выполнить калибровку прибора без использования опорной «горячей» точки.

Предложенная методика построения калибровочной прямой на основе моделирования излучения системы «океан-атмосфера» при различных метеоусловиях пригодна для выполнения калибровки прибора SSMIS с приемлемым уровнем ошибок. Таким образом, предлагается использовать предложенную методику для калибровки прибора МТВЗА-ГЯ.

Также остаются вопросы, связанные с излучательной способностью земных покровов на угле визирования 65 градусов. В настоящее время натурных измерений данного параметра нет, есть только модельные предположения. Поэтому стоит задуматься о проведении подобных подспутниковых измерений.

Работа выполнена в рамках госзадания ИКИ РАН (тема "Мониторинг").

Литература

1. Kummerow C.D., Randel D.L., Kulie M., Wang N.Y., Ferraro R., Munchak S.J., Petkovic V. The Evolution of the Goddard Profiling Algorithm to a Fully Parametric Scheme. // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. 2015. Vol. 32. No. 12. pp. 2265–2280. DOI: 10.1175/JTECH-D-15-0039.1.
2. Zabolotskikh E. and Chapron B. Validation of the New Algorithm for Rain Rate Retrieval from AMSR2 Data Using TMI Rain Rate Product // Advances in Meteorology. 2015. Vol. 2015. Article ID 492603. 12p. DOI: 10.1155/2015/492603.
3. Zhang R., Wang Z., Hilburn K.A.. Tropical Cyclone Rainfall Estimates from FY-3B MWRI Brightness Temperatures Using the WS Algorithm // Remote Sensing. 2018, Vol. 10, ID. 1770. 22p. DOI: 10.3390/rs10111770.
4. Surussavadee C., Staelin D.H.. NPOESS Precipitation Retrievals Using the ATMS Passive Microwave Spectrometer // IEEE GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING LETTERS. 2010. Vol. 7. No. 3. pp. 440–444. DOI: 10.1109/LGRS.2009.2038614.
5. 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. Спутниковый микроволновый сканер/зондировщик МТВЗА-ГЯ // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008. Т. 1. № 5. С. 243–248.
6. Чернявский Г.М., Митник Л.М., Кулешов В.П., Митник М.Л., Чёрный И.В. Микроволновое зондирование океана, атмосферы и земных покровов по данным спутника «Метеор-М» № 2 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 4. С. 78–100. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-78-100.
7. Mitnik L. M., Kuleshov V. P., Mitnik M. L. (2017a) Water vapor in the atmosphere over Greenland and the surrounding seas from measurements of MTVZA-GY, AMSR2, and GMI microwave radiometers // Intern. Symp. “Atmospheric Radiation and Dynamics” (ISARD-2017): abstr. Saint Petersburg, Petrodvorets. 2017. P. 23.
8. Mitnik L. M., Kuleshov V. P., Mitnik M. L., Barsukov I. A., Cherny I. V., Chernyavsky G. M. Multichannel Scanning Imager-Sounder MTVZA-GY on Russian Weather Satellite

- Meteor-M No.2: The Simulated and Measured Brightness Temperatures in the Range of 10–190 GHz // Progress in Electromagnetics Research Symp. (PIERS): abstr. St. Petersburg, Russia. 2017. P. 326.
9. Zabolotskikh E., Mitnik L., Chapron B. An updated geophysical model for AMSR-E and SSMIS brightness temperature simulations over oceans // Remote Sensing. 2014. V. 6. No. 3. P. 2317–2342.
 10. Liu Q., Weng F., English S. J. An improved fast microwave water emissivity model // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2011. V. 49. P. 1238–1250.
 11. Meissner T., Wentz F.J. The emissivity of the ocean surface between 6 and 90 GHz over a large range of wind speeds and earth incidence angles, // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2012. Vol. 50. No. 8. P. 3004–3026.
 12. Mo T. A study of the NOAA near-nadir AMSU-A brightness temperatures over Antarctica // J. Atmos. Oceanic Technology. 2010. V. 27. No. 6. P. 995–1004.
 13. Mo T. Calibration of the NOAA AMSU-A radiometers with natural test sites // IEEE Trans. Geoscience Remote Sensing. 2011. V. 49. No. 9. P. 3334–3342.
 14. Prigent C., Jaumouillé E., Chevallier F., Aires F. A parameterization of the microwave land surface emissivity between 19 and 100 GHz, anchored to satellite-derived estimates // IEEE Trans. Geoscience Remote Sensing. 2008. V. 46. No. 2. P. 344–352.
 15. Tian Y., Peters-Lidard C. D., Harrison K. W., Prigent C., Norouzi H., Aires F., Boukabara S. A., Furuzawa F. A., Masunaga H. Quantifying uncertainties in land-surface microwave emissivity retrievals // IEEE Trans. Geoscience Remote Sens. 2014. V. 52. No. 2. P. 829–840.
 16. Rosenkranz P.W. Water vapor microwave continuum absorption: A comparison of measurements and models // Radio Sci. 1998. N. 33(4). P. 919 – 928.
 17. Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Biavati, G., Horányi, A., Muñoz Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Rozum, I., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Dee, D., Thépaut, J.-N. ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). 2023. DOI: [10.24381/cds.adbb2d47](https://doi.org/10.24381/cds.adbb2d47) (Accessed on 10-Sept-2025).
 18. Kazumori M., English, S.J. Use of the ocean surface wind direction signal in microwave radiance assimilation // Q.J.R. Meteorol. Soc., 2015. V. 141: P. 1354-1375. DOI: 10.1002/qj.2445.