Радиометрическая кросс-калибровка коротковолновых каналов многоканального спутникового устройства КА «Электро-Л» № 2 по данным измерений VIIRS KA Suomi NPP

А.А. Филей¹, А.Н. Рублев², А.А. Зайцев³

¹Дальневосточный центр НИЦ «Планета», Хабаровск, 680000, Россия E-mail: vmer@dvrcpod.ru ² НИЦ «Планета», Москва, 123242, Россия E-mail: rublev@planet.iitp.ru ³ AO «Российские космические системы», Москва, 111250, Россия E-mail: contact@spacecorp.ru

В статье рассмотрена методика кросс-калибровки трех коротковолновых каналов спутникового сканера MCУ-ГС геостационарного космического аппарата (КА) «Электро-Л» № 2 по измерениям сканера VIIRS, установленного на полярно-орбитальном американском спутнике Suomi NPP. Выбор VIIRS в качестве эталона обусловлен частым использованием прибора в различных кросс-калибровочных кампаниях, а также схожими с MCУ-ГС спектральными характеристиками измерительных каналов. Кросс-калибровка заключается в сопоставлении между собой коэффициентов спектральной яркости (КСЯ) на верхней границе атмосферы обоих спутниковых приборов в сходных условиях измерений и количественной оценке получаемых смещений. Для проведения кросс-калибровки отбирались изображения глубокой конвективной облачности (deep convective cloud, DCC), полученные с апреля по август 2017 г. в районе точки стояния KA «Электро-Л» № 2 (76° в.д.). Детектирование DCC осуществлялось с помощью инфракрасного канала VIIRS на длине волны 11 мкм с использованием пороговой яркостной температуры $T_B = 205$ К. Разница по времени между измерениями обоих приборов не превышала 15 мин. Влияние различий в спектральных характеристиках проверяемых каналов на измеряемые величины КСЯ учитывалось на основе математического моделирования.

Ключевые слова: MCУ-ГС, VIIRS, DCC, «Электро-Л», радиометрическая калибровка, коэффициент спектральной яркости

Одобрена к печати: 01.12.2017 DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-7-31-38

Введение

Точная радиометрическая калибровка спутникового прибора является основой для достоверного получения информационных продуктов. Предварительно калибровка проводится на специальных стендах перед запуском космического аппарата, однако после запуска с течением времени происходит старение оптики или снижение чувствительности фотоприемника, что влияет на точность измерений. По этой причине необходимо следить за калибровочными характеристиками спутникового прибора в течение всей его работы на орбите.

В настоящее время методикам калибровки спутниковых приборов посвящено множество исследований, в частности, к ним относится кросс-калибровка различных типов приборов по схемам LEO-LEO, GEO-LEO, GEO-GEO (LEO — low Earth orbit, GEO — geostationary Earth orbit). Для проверки стабильности измерений в коротковолновых каналах спутниковых приборов кросс-калибровки проводятся над поверхностями с высоким значением альбедо, в качестве которых используются естественные пустынные и снежные полигоны (Chen et al., 2013).

В данной работе рассматривается альтернативный метод калибровки сканера МСУ-ГС геостационарного КА «Электро-Л» № 2, основанный на измерениях отраженного солнечного излучения над областями высокой конвективной облачности — DCC (Doelling et al., 2004).

DCC — это переохлажденная облачность, которая имеет высокое стабильное альбедо и проникает в стратосферу до высот 14—19 км (Sohn, Ham, Yang, 2009). Одним из преимуществ использования DCC для кросс-калибровки является минимальное влияние подстилающей поверхности. Верхняя граница DCC находится выше тропопаузы, поэтому эффекты атмосферного ослабления (включая ослабление тропосферным аэрозолем и водяным паром) солнечного излучения минимальны (Doelling et al., 2011). Облачность DCC чаще всего встречается в тропическом поясе Земли, что, в свою очередь, предпочтительно для калибровки приборов геостационарных KA, которые могут наблюдать DCC в течение длительного времени. Согласно работе (Luo, Liu, Stephens, 2008), DCC имеют оптическую толщину (cloud optical depth, COD), часто превышающую 150, и эффективный радиус частиц (Effective particle radius, Re) в районе 20 мкм. В качестве критерия для определения DCC используется яркостная температура T_B верхней границы облака, измеряемая спутниковыми приборам на длине волны 11 мкм.

Кросс-калибровка коротковолновых каналов МСУ-ГС КА «Электро-Л» № 2 проводилась по данным сканера VIIRS КА Suomi NPP. Сканер VIIRS был выбран в качестве эталона, так как он участвовал в многочисленных кросс-калибровках, он обладает сходными с МСУ-ГС спектральными характеристиками коротковолновых каналов. Погрешность радиометрической калибровки коротковолновых каналов VIIRS не превышает 2%. Представленный в работе метод калибровки основан на перекрестном сравнении значений КСЯ двух сканеров в коротковолновом (менее 1 мкм) диапазоне длин волн. Целью калибровки является нахождение калибровочных коэффициентов для каналов сканера МСУ-ГС, которые бы давали наименьшее отклонение измеренных КСЯ от коэффициентов, получаемых VIIRS в сходных условиях измерений.

Оценка влияния различий в спектральных характеристиках MCУ-ГС и VIIRS на измеряемые величины КСЯ при кросс-калибровке

Российский КА «Электро-Л» № 2 был запущен 11 декабря 2015 г. в точку стояния 76° в.д. Основной прибор КА «Электро-Л» — сканер МСУ-ГС, предназначенный для многозональной съемки Земли в коротковолновом и ИК-диапазонах длин волн с пространственным разрешением 1 и 4 км соответственно. Периодичность съемки в штатном режиме — 30 мин. В случае необходимости периодичность съемки (по командам с Земли) может быть изменена до 10–15 мин (http://spaceflight101.com/spacecraft/elektro-l/). Основные параметры коротковолновых каналов двух приборов представлены в табл. 1 (https://www.wmo-sat.info/oscar/ instruments/view/324,https://www.wmo-sat.info/oscar/instruments/view/604).

Характеристика	МСУ-ГС	VIIRS					
	0,50-0,65	0,54–0,56					
Спектральные диапазоны, мкм	0,65–0,80	0,66–0,68					
_	0,80-0,90	0,84–0,88					
Разрешение, км	1	0,75					

Таблица 1. Параметры спектральных каналов МСУ-ГС и VIIRS

На *рис. 1* представлены функции спектральной чувствительности коротковолновых каналов двух приборов, для прибора VIIRS это каналы M4, M5 и M7. Спектральные функции сравниваемых каналов отличаются по положению максимумов и главным образом по ширине. Для оценки влияния этих различий на величины КСЯ были рассчитаны коэффициенты коррекции спектральных функций (spectral band adjustment factors, SBAF). Фактически проводилось моделирование измерений обоими приборами в одинаковых условиях, характеризуемых различными углами наблюдения (VZA) и углового положения Солнца (SZA) при характерных значениях параметров DCC. По вычисленным значениям КСЯ строилась регрессия (прямо пропорциональная зависимость), на основе которой определялись SBAF.



Рис. 1. Функции спектральной чувствительности коротковолновых каналов приборов МСУ-ГС и VIIRS

Моделирование отраженного от DCC солнечного излучения в каналах приборов MCУ-ГС и VIIRS с последующим расчетом коэффициентов SBAF осуществлялось с помощью быстрой радиационной модели (RTM). Так, при моделировании КСЯ в качестве RTM использовался программный модуль The Santa Barbara DISORT (Discrete Ordinates Radiative Transfer) Atmospheric Radiative Transfer (SBDART) (Ricchiazzi et al., 1998), входящий в состав библиотеки libRadtran (http://www.libradtran.org). Эта радиационная модель полностью учитывает многократное рассеяние излучения на частицах облаков в атмосфере.

Чтобы точно смоделировать отраженное от областей DCC солнечное излучение, необходимо знать их геометрические и микрофизические параметры. Так как верхняя часть DCC состоит из частиц льда, то для определения оптических свойств объемного рассеяния частиц льда использовалась модель рассеяния Баума (Baum et al., 2005a, b). Высоты нижней и верхней границы облачности были выбраны равными 1 и 15 км соответственно, а эффективный радиус ледяных частиц Re=20 мкм и оптическая толщина облачности COD=200 (Sohn, Ham, Yang, 2009; Sohn, Choi, Ryu, 2015). Атмосферные условия были представлены в виде тропического профиля (Anderson, Chetwynd, Clough, 1986). В качестве подстилающей поверхности использовалась океаническая вода. Анизотропность отражения учитывалась с помощью функции BRDF (bidirectional reflectance distribution function, http://www.libradtran.org/doc/libRadtran.pdf), которая описывает, как солнечный свет отражается неровной поверхностью в зависимости от разных углов падения.

Уравнения регрессии, полученные на основе расчетов КСЯ коротковолновых каналов, представлены в *табл. 2*.

Таблица 2. Регрессионные уравнения для рассчитанных значений КСЯ коротковолновых каналов МСУ-ГС и VIIRS

Спектральные каналы МСУ-ГС								
1	2	3						
$A_{MCY-\Gamma C} = 1,00 A_{VIIRS}$	$A_{MCY-\Gamma C} = 1,01 A_{VIIRS}$	$A_{MCY-\Gamma C} = 1,00 A_{VIIRS}$						

Как видно из таблицы, только для второй пары сравниваемых каналов МСУ-ГС и VIIRS различия в спектральных характеристика обоих приборов приводят к незначительной (в пределах одного процента) разнице в значениях КСЯ.

Калибровка коротковолновых каналов МСУ-ГС

Измерения КСЯ в каналах прибора VIIRS были получены с сайта https://www.class.ngdc. noaa.gov/saa/products/welcome. Информация же с прибора МСУ-ГС поступает в «НИЦ «Планета» в оперативном режиме и представлена в виде интенсивности излучения, на основании которой и происходит вычисление КСЯ по следующей формуле:

$$A = \frac{\pi R}{F_0 \cdot \cos(SZA)},$$

где А — КСЯ; R — измеренная интенсивность излучения, Вт/(м²·ср); F_0 — эффективный (с учетом спектральной функции чувствительности) интегральный поток солнечного излучения, Вт/(м²); SZA — зенитный угол Солнца.

При расчете эффективного интегрального потока солнечного излучения для каждого канала прибора МСУ-ГС была использована информация о солнечном спектре ASTM G-173-03 (http://rredc.nrel.gov).

Для проведения кросс-калибровки отбирались изображения DCC, полученные с апреля по август 2017 г. в районе точки стояния КА «Электро-Л» № 2. В силу того, что у МСУ-ГС КА «Электро-Л» № 2 десятый канал не работает, детектирование DCC осуществлялось с помощью ИК-канала VIIRS на длине волны 11 мкм с использованием пороговой яркостной температуры $T_B = 205$ К. Разница по времени между сеансами КА «Электро-Л» № 2 и пролетами КА Suomi NPP не превышала 15 мин, так как увеличение временного промежутка сказывалось бы на структуре областей DCC. Зенитные углы наблюдения обоих КА из подоблачных пикселей не превышали 20°, причем их разница лежал в пределах 5°.

Непосредственно для отбора пикселей с DCC, пригодных для кросс-калибровки, использовались следующие критерии: среднеквадратическое отклонение (STD) яркостной температуры на длине волны 11 мкм для блока из 3×3 пикселей не превышало 2 К; средняя температура блока лежала в диапазоне 190–205 K, а STD КСЯ каждого блока в первом канале приборов МСУ-ГС и VIIRS не превышало 3% (Mu et al., 2017).

На *рис.* 2 представлены регрессионные зависимости значений КСЯ в трех парах коротковолновых каналов приборов МСУ-ГС и VIIRS для пяти месяцев (с апреля по август), коэффициенты регрессий представлены в *табл.* 3.



Рис. 2. Регрессия наблюдаемых КСЯ в трех парах коротковолновых каналов приборов МСУ-ГС и VIIRS для пяти месяцев (апрель, май, июнь, июль, август)

Анализируя *табл. 3*, можно заметить, что первая пара сравниваемых каналов сканеров хорошо согласуется друг с другом по измерениям КСЯ: средние различия не превышают 2,5%. В то время как для второго и третьего каналов разница между значениями КСЯ, измеренными и смоделированными над областями DCC, может доходить до 8%. В связи с этим были рассчитаны поправочные коэффициенты для коротковолновых каналов МСУ-ГС, которые позволяют нивелировать эти различия.

Месяц	k_1	k_2	k ₃				
Апрель	1,042	0,916	0,912				
Май	1,008	0,929	0,891				
Июнь	1,021	0,953	0,929				
Июль	1,020	0,948	0,917				
Август	1,026	0,937	0,920				
Среднее	1,023	0,937	0,914				

Габ	блица	3.1	Коэ	фф	рициенты	pe	грессии	между	тремя	парами	каналов	приб	оров	Μ	\mathbf{C}	У-	ΓC	Си	VI	IR	lS
-----	-------	-----	-----	----	----------	----	---------	-------	-------	--------	---------	------	------	---	--------------	----	----	----	----	----	----

Заключение

Представленный в работе метод кросс-калибровки коротковолновых каналов сканера MCУ-ГС по данным измерений VIIRS основан на сопоставлении измерений отраженного солнечного излучения над областями высокой конвективной облачности. Предварительно выполненная путем моделирования спутниковых измерений оценка влияния различий в спектральных характеристиках приборов на разницу в значениях КСЯ показала, что для сравниваемых каналов MCУ-ГС и VIIRS эта разница не превосходит одного процента и в первом приближении ею можно пренебречь.

Кросс-калибровка проводилась в районе точки стояния КА «Электро-Л» № 2. Для калибровки отбирались области DCC, однородность которых проверялась по ряду критериев. Кроме того, зенитные углы наблюдения обоих КА из подоблачных пикселей не превышали 20°, причем их разница лежал в пределах 5°.

По результатам калибровки, выполненной за пять месяцев (с апреля по август) 2017 г., оказалось, что смещение первого канала МСУ-ГС КА «Электро-Л» № 2 относительно опорного канала сканера VIIRS в среднем не превышает 2,5%. Для второго и третьего каналов МСУ-ГС эта разница доходит до 8%. В целом это укладывается в требования тактикотехнического задания на разработку МСУ-ГС, по которому ошибка измерения КСЯ в корот-коволновых каналах сканера может достигать 10%, причем величина систематической ошиб-ки допускается до 8%. Для устранения систематической погрешности были рассчитаны необ-ходимые поправочные коэффициенты.

Данный метод подтвердил свою эффективность и может быть использован как для калибровки коротковолновых каналов сканеров геостационарных КА по эталонным приборам на низкоорбитальных КА (схема кросс-калибровки GEO-LEO), так и для калибровки сканеров низкоорбитальных КА по эталонным сканерам, установленным на геостационарах (схема LEO-GEO).

Литература

- Anderson G.P., Chetwynd J.H., Clough S.A. AFGL Atmospheric Constituent Profiles (0–120 km) / Optical Physics Division, Air Force Geophysics Laboratory. 1986. 43 p.
 Baum B.A., Heymsfield A.J., Yang P., Bedka S.T. (2005a) Bulk scattering models for the remote sensing of ice clouds.
- Baum B.A., Heymsfield A.J., Yang P., Bedka S. T. (2005a) Bulk scattering models for the remote sensing of ice clouds. Part I: Microphysical data and models // J. Applied Meteorology and Climatology. 2005. Vol. 44. P. 1885–1895. DOI: 10.1175/JAM2308.1
- 3. Baum B.A., Yang P., Heymsfield A.J., Platnick S., King M.D., Hu Y-X., Bedka S.T. (2005b) Bulk scattering models for the remote sensing of ice clouds. Part II: Narrowband models // J. Applied Meteorology and Climatology. 2005. Vol. 44. P. 1896–1911. DOI: 10.1175/JAM2309.1.
- 4. *Chen L., Hu X., Xu N., Zhang P.* The Application of Deep Convective Clouds in the Calibration and Response Monitoring of the Reflective Solar Bands of FY-3A/MERSI (Medium Resolution Spectral Imager) // Remote Sensing, 2013. Vol. 5. Issue 12. P. 6958–6975. DOI: 10.3390/rs5126958.
- Doelling D.R., Morstad D.L., Bhatt R., Scarino B. Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) for Deep Convective Cloud (DCC) Technique of Calibrating GEO Sensors with Aqua-MODIS for GSICS / GSICS. 2011. 11 p.
- 6. *Doelling D.R., Nguyen L., Minnis P.* On the use of deep convective clouds to calibrate AVHRR data // Proc. SPIE 49th Ann. Mtg., Earth Observing Systems IX Conf. 2004. 10 p. DOI: 10.1117/12.560047
- 7. *Luo Z., Liu G.Y., Stephens G.L.* CloudSat adding new insight into tropical penetrating convection // Geophysical Research Letters. 2008. Vol. 35. Issue 19. 11 p. DOI: 10.1029/2008GL035330.
- Mu Q., Wu A., Xiong X., Doelling D.R., Angal A., Chang T., Bhatt R. Optimization of a Deep Convective Cloud Technique in Evaluating the Long-Term Radiometric Stability of MODIS Reflective Solar Bands // Remote Sensing. 2017. Vol. 9. Issue 6. 22 p. DOI: 10.3390/rs9060535.
 Ricchiazzi P., Yang S., Gautier C., Sowle D. SBDART: A research and teaching software tool for plane-parallel radi-
- Ricchiazzi P., Yang S., Gautier C., Sowle D. SBDART: A research and teaching software tool for plane-parallel radiative transfer in the Earth's atmosphere // Bulletin of the American Meteorological Society. 1998. Vol. 79. Issue 10. P. 2101–2114. DOI: 10.1175/1520-0477(1998)079<2101:SARATS>2.0.CO;2.
- 10. Sohn B.-J., Ham S.-H., Yang P. Possibility of the visible-channel calibration using deep convective clouds overshooting the TTL // J. Applied Meteorology and Climatology. 2009. Vol. **48.** P. 2271–2283. DOI: 10.1175/2009JAMC2197.1.
- 11. Sohn B.-J., Choi M.-J., Ryu J. Explaining darker deep convective clouds over the western Pacific than over tropical continental convective regions // Atmospheric Measurement Techniques. 2015. Vol. 8. P. 4573–4585. DOI: 10.5194/amt-8-4573-2015.

Radiometric cross-calibration of shortwave channels of Multi-Channel Scanning Unit-Geostationary of Elektro-L No. 2 satellite with the use of Suomi NPP VIIRS measurements

A.A. Filei¹, A.N. Rublev², A.A. Zaitsev³

 ¹ Far-Eastern Center of State Research Center for Space Hydrometeorology "Planeta" Khabarovsk 680000, Russia E-mail: vmer@dvrcpod.ru
² State Research Center "Planeta", Moscow 123242, Russia E-mail: rublev@planet.iitp.ru
³ JSC "Russian Space Systems", Moscow 111250, Russia E-mail: contact@spacecorp.ru

In the given work, we present the results of radiometric cross-calibration of shortwave channels of Multi-Channel Scanning Unit - Geostationary (MSU-GS) sensor on-board Electro-L No. 2 satellite with the use of Suomi NPP VIIRS measurements. VIIRS measurements have been chosen as a reference because they are continually updated and are similar to the MSU-GS in spectroscopic characteristics. Radiometric cross-calibration compares a top of atmosphere reflectance (TOA reflectance) of both satellite instruments at the upper boundary of the atmosphere. For this purpose test polygon areas of deep convective clouds (DCC) were selected. The infrared channel of VIIRS at a wavelength

of 11 microns with the 205 K threshold was used for DCC identification. The MSU-GS and VIIRS data received from April to August 2017 were used in the calibration. The difference in time between the sessions of Electro-L No. 2 and Suomi NPP satellites did not exceed 15 minutes. The differences of spectral characteristics of the shortwave channels of the two satellite instruments were taken into account using the radiative simulation.

Keywords: MSU-GS, VIIRS, DCC, Electro-L, radiometric calibration, TOA reflectance

Accepted: 01.12.2017 DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-7-31-38

References

- 1. Anderson G.P., Chetwynd J.H., Clough S.A., AFGL Atmospheric Constituent Profiles (0-120 km), 1986, 43 p.
- Baum B.A., Heymsfield A.J., Yang P., Bedka S.T., Bulk scattering models for the remote sensing of ice clouds. Part I: Microphysical data and models, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2005, Vol. 44, pp. 1885–1895, DOI: 10.1175/JAM2308.1.
- 3. Baum B.A., Yang P., Heymsfield A.J., Platnick S., King M.D., Hu Y-X., Bedka S.T., Bulk scattering models for the remote sensing of ice clouds. Part II: Narrowband models, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2005a, Vol. 44, pp. 1896–1911, DOI: 10.1175/JAM2309.1.
- Chen L., Hu X., Xu N., Zhang P., The Application of Deep Convective Clouds in the Calibration and Response Monitoring of the Reflective Solar Bands of FY-3A/MERSI (Medium Resolution Spectral Imager), *Remote Sensing*, 2013, Vol. 5, Issue 12, pp. 6958–6975, DOI: 10.3390/rs5126958.
- 5. Doelling D.R., Morstad D.L., Bhatt R., Scarino B., Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) for Deep Convective Cloud (DCC) Technique of Calibrating GEO Sensors with Aqua-MODIS for GSICS, 2011, 11 p.
- 6. Doelling D.R., Nguyen L., Minnis P., On the use of deep convective clouds to calibrate AVHRR data, *Proc. SPIE* 49th Ann. Mtg., Earth Observing Systems IX Conf., 2004, 10 p., DOI: 10.1117/12.560047.
- 7. Luo Z., Liu G.Y., Stephens G.L., CloudSat adding new insight into tropical penetrating convection, *Geophysical Research Letters*, 2008, Vol. 35, Issue 19, 14 p., DOI: 10.1029/2008GL035330.
- Mu Q., Wu A., Xiong X., Doelling D.R., Angal A., Chang T., Bhatt R., Optimization of a Deep Convective Cloud Technique in Evaluating the Long-Term Radiometric Stability of MODIS Reflective Solar Bands, *Remote Sensing*, 2017, Vol. 9, Issue 6, 22 p., DOI: 10.3390/rs9060535.
- Ricchiazzi P., Yang S., Gautier C., Sowle D., SBDART: A research and teaching software tool for plane-parallel radiative transfer in the Earth's atmosphere, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1998, Vol. 79, Issue 10, pp. 2101–2114, DOI: 10.1175/1520-0477(1998)079<2101:SARATS>2.0.CO;2.
- Sohn B.-J., Ham S.-H., Yang P., Possibility of the visible-channel calibration using deep convective clouds overshooting the TTL, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2009, Vol.48, pp. 2271–2283, DOI: 10.1175/2009JAMC2197.1.
- Sohn B.-J., Choi M.-J., Ryu J., Explaining darker deep convective clouds over the western Pacific than over tropical continental convective regions, *Atmospheric Measurement Techniques*, 2015, Vol. 8, pp. 4573–4585, DOI: 10.5194/ amt-8-4573-2015.