Полетная радиометрическая кросс-калибровка комплекса многозональной спутниковой съемки на КА «Метеор-М» №1 по спектрорадиометру MODIS на КА Terra

Б.С. Жуков¹, Т.В. Кондратьева¹, И.В. Полянский¹, Л.И. Пермитина²

¹Институт космических исследований РАН, Москва, Россия E-mail: bzhukov@iki.rssi.ru ²Научный центр оперативного мониторинга Земли, Федеральное космическое агенство Москва, Россия, E-mail: permitina@ntsomz.ru

На КА «Метеор-М» №1 установлен комплекс многозональной спутниковой съемки (КМСС), в состав которого входят две трехзональные камеры МСУ-100 с пространственным разрешением 60 м и одна трехзональная камера МСУ-50 с разрешением 120 м. Полетная радиометрическая кросс-калибровка камер КМСС проволится ежегодно по спектроралиометру MODIS на КА Тегга с использованием данных съемок однородного снежного покрова в районе с географическими координатами 70-80° ю.ш., 90-130° в.д. на высокогорном Антарктическом плато. Путем моделирования спектров отражения природных объектов на верхней границе атмосферы получены регрессионные соотношения, позволяющие пересчитывать значения коэффициентов спектральной яркости (КСЯ), измеряемые в спектральных зонах КМСС и MODIS. По данным MODIS получены калибровочные функции, аппроксимирующие зависимость КСЯ антарктического снега на верхней границе атмосферы от углов наблюдения и Солнца для каждого канала камер КМСС. Кросскалибровка КМСС и MODIS проводится путем сопоставления значений КСЯ снежного покрова Антарктиды, измеряемых элементарными детекторами линейных ПЗС-фотоприемников камер КМСС, с калибровочными функциями. Для каждого элементарного детектора проводится усреднение измерений по нескольким десяткам тысяч отсчетов. Точность относительной радиометрической калибровки камер КМСС оценивается в ~2%, абсолютной - 6-7%. Приводятся распределения коэффициента чувствительности для каждого канала камер КМСС по данным калибровок зимой 2012-2013 гг. Изменение чувствительности в полете за время наблюдений с 2010 по 2013 гг. сопоставимо с ошибками калибровок. Более надежное заключение о деградации чувствительности камер в полете требует более длинного ряда наблюдений.

Ключевые слова: КМСС, MODIS, полетная радиометрическая калибровка, КСЯ снега, индикатриса рассеяния снега.

Введение

Комплекс многозональной спутниковой съемки (КМСС) на КА "Метеор-М" №1, включающий в себя две камеры МСУ-100 (условно называемые МСУ-101 и МСУ-102) и одну камеру МСУ-50, проводит ежедневную съемку территории России и прилегающих стран в видимом и ближнем ИК диапазонах с разрешением 60/120 м в полосе обзора шириной более 900 км (Аванесов и др., 2013). Видеоданные КМСС, дополненные синхронной навигационной информацией, автоматически принимаются, обрабатываются в потоковом режиме, архивируются и каталогизируются на наземных приемных станциях в Москве, Новосибирске и Хабаровске. Полученные материалы используются для решения широкого круга задач землепользования, экологического мониторинга, контроля чрезвычайных ситуаций, оценки ледовой обстановки на морях, реках, озерах и водохранилищах и др.

Хотя камеры КМСС прошли наземную радиометрическую калибровку (Ваваев и др., 2009), вариации температуры и внешние воздействия на фотоприемники, а также ес-

тественное старение оптических и электронных компонентов могут привести к изменению радиометрических характеристик камер в полете. КМСС позволяет контролировать электронное смещение сигнала камер в полете, но не имеет внутренних калибровочных источников излучения. Поэтому для контроля изменений чувствительности камер ежегодно в зимний сезон проводится полетная радиометрическая кросс-калибровка КМСС по спектрорадиометру MODIS на КА Тегга с использованием результатов съемок снежного покрова Антарктиды. Специфицированная точность абсолютной калибровки MODIS ~5% поддерживается в полете с помощью его внутренней калибровки, калибровки по Луне и наземным тестовым участкам (Wu et al., 2013).

Кросс-калибровка КМСС по MODIS важна также для приложений, поскольку для обработки данных MODIS разработано значительное число широко используемых на практике алгоритмов оценки состояния поверхности Земли и атмосферы (http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/index.php), которые могут быть адаптированы для обработки данных КМСС.

Характеристики КМСС и MODIS

Основные характеристики камер МСУ-100 и МСУ-50, входящих в состав КМСС, приведены в *табл. 1*.

Παταστάσταστα	Камера			
Параметры	МСУ-100	МСУ-50		
Фотоприемники	3 линейных ПЗС			
Число элементов в строке	3×7	926		
Захват, км (Н = 830 км)	960	940		
	(двумя камерами)			
Проекция элемента на поверхность, м	60	120		
(Н = 830 км)				
Спектральные каналы	№1: 0,7-0,9 мкм	№1: 0,45-0,51 мкм		
	№2: 0,63-0,68 мкм	№2: 0,37-0,45 мкм		
	№3: 0,535-0,575 мкм	№3: 0,58-0,69 мкм		
Частота строк, Гц	156,25			
Информационный поток одной камеры,	~30			
Мбит/сек				
Разрядность АЦП / изображения, бит	16 / 8			
Динамический диапазон ПЗС	5000			
Масса, кг	2,9	2,3		
Максимальное энергопотребление, Вт	6,8	6,8		
Число камер	2	1		

Таблица	1.	Xa	рактер	оистики	камер	КN	ЛСС
---------	----	----	--------	---------	-------	----	-----

Каналы 1 и 3 камер смотрят, соответственно, вперед и назад под углом 8,67° для MCУ-100 и 16,95° для MCУ-50, каналы 2 – в надир. Два прибора MCУ-100 устанавливаются на приборную платформу КА таким образом, что их оптические оси отклоняются от «вертикальной» оси космического аппарата на угол $\pm 14^{\circ}$ в плоскости, перпендикулярной плоскости орбиты. В результате обеспечивается формирование суммарной полосы обзора камер MCУ-100, примерно равной ширине полосы обзора MCУ-50.

Спектральные зоны МСУ-100 оптимизированы для исследования поверхности суши, а МСУ-50 – для исследования акваторий.

MODIS является оптико-механическим сканером. Его основные характеристики приведены в *табл. 2*.

Параметр	Значение
Угол сканирования	±55°
Полоса обзора (Н = 705 км)	2330 км
Спектральные зоны	16 зон в диапазоне 0,4 - 1 мкм
	4 зоны в диапазоне 1,2 – 2,4 мкм
	6 зон в диапазоне 3 – 5 мкм
	10 зон в диапазоне 6 – 15 мкм
Разрешение в надире (Н = 705 км)	250 м (зоны 1-2), 500 м (зоны 3-7), 1 км (зоны 8-36)
Разрядность изображения, бит	12

Таблица 2. Характеристики спектрорадиометра MODIS на КА Terra

Различие во времени между изображениями одних и тех же объектов, получаемыми КМСС и MODIS, обычно находится в пределах 0,5 часа, но в отдельных случаях может превышать 2 часа, когда участок съемки КМСС находится на краю ближайшего по времени изображения MODIS и подвержен сильным перспективным искажениям – в этом случае выбирается изображение MODIS, полученное на следующем витке.

Для корректной кросс-калибровки КМСС и MODIS необходимы:

- пространственное совмещение данных КМСС и MODIS;
- высокая отражательная способность наблюдаемых участков для получения высокого отношения сигнал/шум;
- наличие безоблачных и стабильных атмосферных условий в интервале времени между съемками КМСС и MODIS;
- учет различия спектральных зон КМСС и MODIS;
- учет различия высоты Солнца и углов наблюдения в моменты съемок КМСС и MODIS.

Преимущества калибровки по снежному покрову Антарктиды

В рамках CEOS (the Committee on Earth Observation Satellites) создана сеть наземных тестовых участков для валидации калибровки спутниковых оптических съемочных систем, в которую включены однородные хорошо отражающие участки без существенного растительного покрова, а также район Dome C в Антарктиде (http://calval.cr.usgs.gov/rstresources/sites_catalog). Эти тестовые участки имеют размер, не превышающий 100 км (а в большинстве случаев значительно меньший), и хорошо подходят для валидации калибровки спутниковых систем путем сопоставления наземных и спутниковых измерений коэффициентов спектральной яркости (КСЯ) этих участков.

Для полной калибровки камер КМСС по всему полю зрения, т.е. калибровки абсолютной чувствительности каждого элементарного детектора ПЗС-линеек, требуются значительно более протяженные однородные участки с размером порядка 1000 км. Такими являются внутренние районы Антарктиды и Гренландии, которые широко использовались для калибровки съемочных систем AVHRR на КА серии NOAA (Loeb, 1997; Masonis and Warren, 2001; Tahnk and Coakley, 2002).

Для кросс-калибровки КМСС и MODIS выбран район с координатами 70-80° ю.ш., 90-130° в.д., расположенный на Антарктическом плато на высоте более 3 км и включающий тестовый участок Dome C (75° ю.ш., 123° в.д.). Этот район обладает высокой однородностью снежного покрова и обычно на больших площадях свободен от облаков. Отсутствие существенных источников загрязнений и процессов таяния снега делают альбедо снега в указанном районе достаточно стабильным. Вследствие малых наклонов поверхности (менее $0,4^{\circ}$ на базе 10 км) их влиянием на индикатрису рассеяния снега можно пренебречь. При углах наблюдения КМСС менее 40° снежные дюны (заструги) оказывают слабое влияние на индикатрису рассения (Warren et al., 1998). Кроме того, из-за отсутствия доминирующего направления ветра в указанных районах ориентация этих дюн также не имеет доминирующего направления, и их эффект нивелируется при пространственном усреднении.

Другое преимущество указанного района – высокая прозрачность атмосферы: горизонтальная дальность видимости здесь составляет ~100 км, содержание водяного пара в атмосфере (Water Vapor Column - WVC) - 0,02-0,12 см в зависимости от сезона. Относительно медленные вариации содержания озона, имеющего слабые полосы поглощения Шаппюи в диапазоне 0,45-0,75 мкм, не играют роли при межсенсорной калибровке КМСС и MODIS.

Для разделения снега и облаков, которые бывает трудно дифференцировать в данных КМСС, использовался канал 6 MODIS (1,640 мкм), где снег значительно темнее облаков.

Факторами, которые необходимо учитывать при кросс-калибровке КМСС и MODIS по снежному покрову Антарктиды, являются различие спектральных зон, а также направлений освещения и наблюдения в момент съемок.

Учет различия спектральных зон КМСС и MODIS

В данном разделе рассматривается методика пересчета КСЯ природных объектов, измеряемого на верхней границе атмосферы в спектральных зонах КМСС и MODIS. Использование КСЯ вместо яркости позволяет частично компенсировать влияние вариаций высоты Солнца. КСЯ в относительно широких спектральных зонах КМСС и MODIS можно определить в соответствии со способом его измерения по соотношению:

$$\rho_i = \pi L_i / (F_{s,i} \cos \theta_s), \qquad (1)$$

где $L_i = \int s_i(\lambda)L(\lambda)d\lambda / \int s_i(\lambda)d\lambda$ - зональная яркость системы поверхность-атмосфера, $F_{s,i} = \int s_i(\lambda)F_s(\lambda)d\lambda / \int s_i(\lambda)d\lambda$ - зональный поток солнечного излучения на верхней границе атмосферы, $L(\lambda)$ и $F_s(\lambda)$ - спектральная яркость системы поверхность-атмосфера и спектральный поток солнечного излучения, $s_i(\lambda)$ - функция спектральной чувствительности (ФСЧ) спектральной зоны *i* съемочной системы , λ – длина волны, ϑ_s - зенитный угол Солнца.

ФСЧ каналов МСУ-100 и МСУ-50 сопоставлены с ФСЧ наиболее близких им каналов MODIS на *рис.* 1.



Рис. 1. Функции спектральной чувствительности каналов МСУ-100 (а) и МСУ-50 (б), показанные красным цветом, и соответствующих им каналов MODIS, показанные синим цветом, на фоне модельных спектров отражения природных объектов

«Красный» и «зеленый» каналы 2 и 3 МСУ-100 близки к каналам 1 и 4 MODIS. Широкий спектральный канал 1 МСУ-100 в ближнем ИК диапазоне покрывает канал 2 MODIS, расположенный на «спектральном плато» растительности, и каналы 17 и 19, находящиеся в полосе поглощения водяного пара.

Спектральные зоны «синего» и «УФ» каналов 1 и 2 МСУ-50 значительно шире, чем зоны соответствующих каналов 10 и 9 MODIS. «Оранжевый» канал 3 МСУ-50 покрывает как «красный» канал 1 MODIS, так и частично его «зеленый» канал 4.

Поскольку соотношение между значениями КСЯ, измеряемыми в спектральных зонах КМСС и MODIS, зависит от спектрального распределения яркости наблюдаемых объектов, это соотношение было проанализировано с помощью модельных расчетов для широкого круга природных объектов и атмосферных условий. Для этого использовались:

(1) КСЯ почв, растительности, воды и снега из спектральной библиотеки ASTER (http://speclib.jpl.nasa.gov, 50 спектров);

(2) стандатные модели MODTRAN: лето средних широт, зима средних широт, субарктическая зима при горизонтальной дальности видимости 23 и 5 км и при зенитных углах Солнца ϑ_S от 40 до 80° (10 моделей);

(3) специальные модели антарктического снега, для чего использовались КСЯ мелко- и среднезернистого снега из библиотеки ASTER и 12 моделей антарктической атмосферы (содержание водяного пара 0,02 и 0,12 см, горизонтальная дальность видимости 50 и 100 км, зенитные углы Солнца от 60 до 75°);

(4) 5 стандартных моделей облаков MODTRAN.

Общее число различных сочетаний природных объектов и моделей атмосферы при моделировании составило 529.

Яркость природных объектов на верхней границе атмосферы рассчитывалась по соотношению:

$$L(\lambda) = T_a(\lambda)r_0(\lambda)E(\lambda)/\pi + A(\lambda), \qquad (2)$$

где $r_0(\lambda)$ – КСЯ поверхности, $T_a(\lambda)$ - прозрачность атмосферы, $A(\lambda)$ - яркость атмосферной дымки, $E(\lambda)$ - освещенность поверхности. Далее по соотношению (1) находились значения КСЯ наблюдаемых объектов в спектральных зонах камер КМСС и MODIS и использовались для анализа их взаимосвязи (*puc. 2, 3*).



Рис. 2. Связь КСЯ природных объектов в спектральных зонах MCУ-100 и MODIS по результатам моделирования



Рис. 3. Связь КСЯ природных объектов в спектральных зонах MCУ-50 и MODIS по результатам моделирования

Полученные регрессионные соотношения для пересчета значений КСЯ между спектральными зонами камер КМСС и MODIS приведены в *табл. 3*.

Таблица 3. Рег	рессионные соо	тношения	для пере	есчета з	вначений	КСЯ меж	цy
спектральнымі	и зонами камер	КМСС и М	IODIS (n	nod <i>i</i> – I	КСЯ в зоі	He i MODI	S)

Канал	Регрессионное соотношение	СКО	
		по всем антаркти	
		объектам	ческий снег
Камеры МСУ-100:			
канал 1 (0,78-0,90 мкм)	0,658mod2+0,161mod17+0,160mod19	0,0044	0,0037
канал 2 (0,63-0,68 мкм)	1,006mod1	0,0019	0,0058
канал 3 (0,535-0,575 мкм)	0,990mod4	0,0024	0,0075
Камера МСУ-50:			
канал 1 (0,45-0,51 мкм)	1,008mod10	0,0024	0,0045
канал 2 (0,37-0,45 мкм)	0,998mod9	0,0066	0,0006
канал 3 (0,58-0,69 мкм)	0,734mod4+0,233mod1	0,0033	0,0075

Среднеквадратическая ошибка пересчета КСЯ между спектральными зонами КМСС и MODIS, рассчитанная по всем объектам, составляет 0,002-0,007 в зависимости от спектральной зоны. Примерно в таком же интервале лежит среднеквадратическая ошибка пересчета КСЯ для антарктического снега. Поскольку эта ошибка значительно меньше ошибки учета влияния индикатрисы рассеяния снега (см. ниже), нет необходимости для калибровки по Антарктиде использовать специальные регрессионные зависимости, построенные с использованием только моделей антарктического снега.

Зависимость КСЯ от высоты Солнца и углов наблюдения

Съемки КМСС и MODIS одних и тех же участков Антарктиды происходят при различных высоте Солнца и углах наблюдения. Учитывая, с одной стороны, зависимость КСЯ снега от углов освещения и наблюдения и, с другой стороны, наличие протяженных однородных участков снежного покрова, важнее выбрать для сопоставления данных КМСС и MODIS участки, наблюдаемые под одними и теми же углами освещения и наблюдения, чем добиваться точного пространственного совмещения данных. С этой целью по результатам обработки снимков MODIS, полученных в районе съемок КМСС с интервалом времени до ~2 час, строилась индикатриса рассеяния антарктического снега на верхней границе атмосферы. Для этого на изображениях MODIS выбирались однородные безоблачные участки, и для каждого окна в 5х5 пикселов рассчитывался средний КСЯ в каналах MODIS 1, 2, 4, 9, 10, 17 и 19, зенитный угол Солнца ϑ_S , зенитный угол наблюдения ϑ и разность азимутов между плоскостью наблюдения и плоскостью солнечного вертикала Δφ. Значения КСЯ в указанных спектральных зонах MODIS пересчитывались в КСЯ в зонах камер КМСС.

В качестве первого шага исследовалась зависимость КСЯ антарктического снега в спектральных зонах КМСС от зенитного угла Солнца ϑ_S . Получено, что в диапазоне ϑ_S от 60 до 75°, при котором проводятся съемки КМСС, КСЯ снега линейно убывает с увеличением ϑ_S – см., например, *рис.* 4 для МСУ-100. По всем точкам, для которых зенитные углы наблюдения ϑ не превышали 40° (диапазон изменения угла ϑ для КМСС), построены линейные регрессионные зависимости КСЯ от ϑ_S .



Рис. 4. Зависимость КСЯ снежного покрова Антарктиды в спектральных зонах МСУ-100 от зенитного угла Солнца д_S по результатам обработки снимков MODIS; цветом показаны диапазоны зенитного угла наблюдения д (январь-февраль 2013 г.)



Рис. 5. Ошибки коррекции влияния зенитного угла Солнца на КСЯ снежного покрова Антарктиды в спектральных зонах МСУ-100

Затем анализировались отклонения точек от указанных линий регрессии, в результате чего выделена их зависимость от зенитного угла наблюдения ϑ : при увеличении ϑ указанные отклонения увеличиваются и могут быть аппроксимированы квадратичными функциями (рис. 5). Полученные в результате индикатрисы рассеяния антарктического снега в спектральных зонах КМСС как функции ϑ_S и ϑ приведены в *табл.* 4. Учет влияния зенитного угла наблюдения ϑ особенно существенен при больших значениях ϑ , где он позволил уменьшить максимальную среднеквадратическую ошибку моделирования индикатрисы рассеяния антарктического снега с 0,03 до 0,02. Эти остаточные ошибки включают, в частности, неучтенную зависимость КСЯ снега от азимутального угла Дф. Эта зависимость не могла быть детально исследована, поскольку для MODIS значения $\Delta \phi$ составляют в большинстве случаев ~60 и ~120° для «левого» и «правого» борта и отличаются от значений ∆о для камер КМСС, которые могут изменяться от 0 до 180° из-за дополнительно наклона камер вдоль трассы полета. Тем не менее, несмотря на это ограничение, среднеквадратическая ошибка относительной полетной калибровки камер КМСС, определяемая точностью аппроксимации индикатрисы рассеяния снежного покрова Антарктиды в ~2%, сопоставима с точностью наземной калибровки. Учитывая точность абсолютной калибровки MODIS ~5%, ошибку абсолютной калибровки КМСС можно оценить в 6-7%.

Хотя для кросс-калибровки с КМСС в каждый зимний сезон используются индикатрисы рассеяния снега, построенные по данным MODIS, полученным в этот же сезон, сравнение индикатрис, полученных за три сезона, показало, что их различие не превышает указанной ошибки моделирования индикатрис.

Канал	Индикатриса рассеяния
Камеры МСУ-100:	
канал 1 (0,78-0,90 мкм)	$\rho = 0,891 - 0,00198 \cdot \vartheta_S - 0,000440 \cdot \vartheta + 0,0000299 \cdot \vartheta^2$
канал 2 (0,63-0,68 мкм)	$\rho = 1,145 - 0,00518 \cdot \vartheta_S + 0,000135 \cdot \vartheta + 0,0000161 \cdot \vartheta^2$
канал 3 (0,535-0,575 мкм)	$\rho = 1,225 - 0,00608 \cdot \vartheta_{S} + 0,000199 \cdot \vartheta + 0,0000153 \cdot \vartheta^{2}$
Камера МСУ-50:	
канал 1 (0,45-0,51 мкм)	$\rho = 1,124 - 0,00521 \cdot \vartheta_{S} + 0,000272 \cdot \vartheta + 0,0000384 \cdot \vartheta^{2}$
канал 2 (0,37-0,45 мкм)	$\rho = 1,196 - 0,00454 \cdot \vartheta_S + 0,000407 \cdot \vartheta + 0,0000440 \cdot \vartheta^2$
канал 3 (0,58-0,69 мкм)	$\rho = 1,126 - 0,00521 \cdot \vartheta_S - 0,000145 \cdot \vartheta + 0,0000153 \cdot \vartheta^2$

Таблица 4. Зависимость КСЯ снежных полей Антарктиды от зенитных углов Солнца ϑ_S и наблюдения ϑ для спектральных каналов камер КМСС (по данным MODIS, 2012-2013 гг.)

Методика и результаты калибровки

Радиометрическая коррекция исходных изображений КМСС требует знания темнового сигнала и коэффициента чувствительности каждого элементарного детектора ПЗС-

фотоприемников (Жуков и др., 2008). Коррекция электронного смещения, которое является основной составляющей темнового сигнала, проводится построчно по измерению сигнала «темновых» пикселов, расположенных в начале ПЗС-линеек каждого канала. Неоднородность темнового сигнала, связанная с разбросом темнового тока элементарных детекторов, обычно меньше одной градации сигнала при реальных временах экспозиции в 2-4 мс. Ее коррекция, проводимая по результатам наземной калиброки, имеет значение лишь для небольшого числа «дефектных» элементов.

Проверка коэффициентов чувствительности элементарных детекторов проводится путем кросс-калибровка камер КМСС и MODIS. Для этого индикатриса рассеяния снежного покрова Антарктиды на верхней границе атмосферы, рассчитанная по данным MODIS для спектральных зон камер КМСС (*табл. 4*), используется в качестве калибровочной функции. Значения КСЯ снежного покрова, измеряемые каждым элементарным детектором в каждом канале КМСС, сопоставляются со значением калибровочной функцией данного канала при тех же углах освещения и наблюдения, и для каждого элементарного детектора *x* находится поправочный коэффициент

$$k(x) = \sum_{y} r_{MODIS}(x, y) / \sum_{y} r(x, y) ,$$

где усреднение проводится по строкам *у* изображений КМСС, число которых в процессе калибровки обычно составляло 20000-30000.

Поправочный коэффициент используется для коррекции текущего распределения коэффициента чувствительности:

$$c_{new}(x) = c(x)/k(x) \quad .$$

Примеры использованных при калибровке изображений КМСС показаны на *рис. 6.* Полученные в результате распределения чувствительности каналов МСУ-101 и МСУ-50 по результатам калибровки в зимний период 2012-1013 г. приведены на *рис. 7 и 8.* Они носит типичный для оптических съемочных систем характер: на общий спад чувствительности к краям, определяемый уменьшением освещенности фокальной плоскости, накладываются небольшие высокочастотые вариации чувствительности между элементарными детекторами ПЗС-фотоприемников. Исключение составляет ближний ИК канал камер МСУ-100, где чувствительность примерно одинакова по всей длине ПЗС. Этот эффект можно объяснить расширением спектральной зоны из-за сдвига ее коротковолновой границы, формируемой отрезающим интерференционным фильтром, при увеличении угла наблюдения. На следующих КА ближняя ИК зона МСУ-100 формируется полосовым интерференционным фильтром, вследствие чего ее расширение будет несущественным.



Рис. 6. Примеры использованных при калибровке изображений КМСС: верхний ряд – изображения МСУ-101, средний ряд - изображения МСУ-102, нижний ряд – изображения МСУ-50



Рис. 7. Распределение коэффициента чувствительности элементарных детекторов камеры MCV-101 по результатам калибровки по снежному покрову Антарктиды в зимний сезон 2012-2013 гг.



Рис. 8. Распределение коэффициента чувствительности элементарных детекторов камеры МСУ-50 по результатам калибровки по снежному покрову Антарктиды в зимний сезон 2012-2013 гг.



Рис. 9. Распределение коэффициента чувствительности элементарных детекторов камеры MCУ-102 по результатам калибровок по снежному покрову Антарктиды за три зимних сезона

Изменение чувствительности камеры МСУ-102 между тремя сезонами калибровок по Антарктиде показано на *рис. 9* (для остальных камер КМСС в предыдущие годы наблюдений отсутствует достаточно представительные данные). Можно отметить относительно небольшое межгодовое изменение чувствительности в полете, которое сопоставимо с ошибками калибровок. Более надежное заключение о деградации чувствительности камер КМСС в полете требует более длинного ряда наблюдений.

Заключение

Разработана методика кросс-калибровки камер КМСС по спектрорадиометру MODIS с использованием данных съемок снежного покрова Антарктиды. При этом учитывается различие спектральных зон и зенитных углов освещения и наблюдения. Средне-квадратическая ошибка относительной калибровки камер КМСС оценивается в ~2%, абсолютной – в 6-7%.

Литература

- 1. Аванесов Г.А., Полянский И.В., Жуков Б.С., Никитин А.В., Форш А.А. Комплекс многозональной спутниковой съёмки на борту КА «Метеор-М» № 1: три года на орбите // Исследование Земли из космоса. 2013. № 2. С. 74–83.
- 2. Ваваев В.А., Василейский А.С., Жуков Б.С., Жуков С.Б., Куркина А.Н., Полянский И.В. Наземная калибровка камер КМСС для КА «Метеор-М» №1 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2009. Вып. 6. Т. 1. С. 251-258.
- Жуков Б.С., Василейский А.С., Жуков С.Б., Зиман Я.Л., Полянский И.В., Бекренев О.В., Пермитина Л.И. Предварительная обработка видеоданных КМСС с КА «Метеор-М» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008. Вып. 5. Т. 1. С. 260-266.
- Dumont M., Brissaud O., Picard G., Schmitt B., Gallet J.-C., Arnaud Y. High-accuracy measurements of snow bidirectional reflectance distribution function at visible and NIR wavelengths – comparison with modelling results // Atmos. Chem. Phys. 2010. Vol. 10. P. 2507–2520.
- 5. *Loeb N. G.* In-flight calibration of NOAA AVHRR visible and near-IR bands over Greenland and Antarctica // Int. J. Remote Sensing. 1997. Vol. 18. No. 3. P. 477 490.
- 6. *Masonis S. J., Warren S.G.*. Gain of the AVHRR visible channel as tracked using bidirectional refectance of Antarctic and Greenland snow // Int. J. Remote Sensing. 2001. Vol. 22. No. 8. P. 1495–1520.
- 7. *Tahnk W.R, Coakley J.A.* Jr. Improved calibration coefficients for NOAA-12 and NOAA-15 visible and near-IR channels // J. Atmos. Oceanic Technol. 2002. Vol. 19. 1826-1833.
- 8. Warren S.G., Brandt R.E., Hilton P.R. Effect of surface roughness on bidirectional reflectance of Antarctic snow // J. Geophys. Res. 1998. Vol. 103. No. E11. P. 25789-25807.
- Wu A.S., Xiong X.X., Doelling D.R., Morstad D., Angal A., Bhatt R. Characterization of Terra and Aqua MOD-IS VIS, NIR, and SWIR Spectral Bands' Calibration Stability // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2013. Vol. 51. No.7. P. 4330-4338.

In-flight radiometric cross-calibration of Multispectral Satellite Imaging System on-board Meteor-M No. 1 relative to spectroradiometer MODIS on-board Terra

B.S. Zhukov¹, T.V. Kondrat'eva¹, I.V. Polyansky¹, L.I. Permitina²

¹Space Research Institute RAS, Moscow, Russia E-mail: bzhukov@iki.rssi.ru ²Research Center for Earth Operative Monitoring, Russian Federal Space Agency, Moscow, Russia, E-mail: permitina@ntsomz.ru

The multispectral satellite imaging system KMSS on-board Meteor-M No. 1 spacecraft consists of two 3-channel MSU-100 cameras with a spatial resolution of 60 m and one 3-channel MSU-50 camera with a spatial resolution of 120 m. The in-flight radiometric cross-calibration of the KMSS cameras relative spectroradiometer MODIS on-board Terra is performed yearly using images of homogeneous snow cover in the area with geographical coordinates of 70-80° S, 90-130° E on the high-altitude Antarctic Plateau. Simulations of the top-of-atmosphere spectral reflectance of various objects resulted in regressions between the reflectances measured in the spectral bands of KMSS and MODIS. Using the MODIS data, calibration functions are obtained that approximate the top-of-atmosphere snow reflectance as a function of the illumination and observations angles in each KMSS channel. Then the KMSS calibration is performed by comparing reflectances of Antarctic snow as measured by KMSS CCD linear arrays elements with the calibration functions. Averaging is performed over a few tens of thousands of reflectance measurements by each detector element. The relative KMSS radiometric calibration accuracy is estimated as ~2%, while the absolute accuracy as 6-7%. Absolute sensitivity distribution along the CCD line array of each KMSS channel is presented as obtained during the winter calibration session of 2012-2013. KMSS sensitivity variation during 2010-2013 was comparable to the calibration errors. More reliable conclusion on KMSS in-flight sensitivity degradation requires a longer time-series of observations.

Keywords: KMSS, MODIS, in-flight radiometric calibration, snow reflectance, snow BDRF.

References

- 1. Avanesov G.A., Polyanskii I.V., Zhukov B.S., Nikitin A.V., Forsh A.A. Kompleks mnogozonal'noi sputnikovoi s"emki na bortu KA «Meteor M» № 1: tri goda na orbite (Multispectral satellite imaging system on-board "Meteor-M" Nr.1 spacecraft: three years in orbit), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2013, No. 2, pp. 74–83.
- Vavaev V.A., Vasileiskii A.S., Zhukov B.S., Zhukov S.B., Kurkina A.N., Polyanskii I.V. Nazemnaya kalibrovka kamer KMSS dlya KA «Meteor-M» No.1 (On-ground calibration of KMSS cameras for Meteor-M No. 1 spacecraft), Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa, 2009, Issue 6, Vol. 1, pp. 251-258.
- Zhukov B.S., Vasileiskii A.S., Zhukov S.B., Ziman Ya.L., Polyanskii I.B., Bekrenev O.V., Permitina L.I. Predvaritel'naya obrabotka videodannykh KMSS s KA «Meteor-M» (Pre-processing of imaging data from Meteor-M spacecraft), Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa, 2008, Issue 5, Vol. 1, pp. 260-266.
- 4. Dumont M., Brissaud O., Picard G., Schmitt B., Gallet J.-C., Arnaud Y., High-accuracy measurements of snow bidirectional reflectance distribution function at visible and NIR wavelengths comparison with modelling results, *Atmos. Chem. Phys.*, 2010, Vol. 10, pp. 2507–2520.
- 5. Loeb N.G. In-flight calibration of NOAA AVHRR visible and near-IR bands over Greenland and Antarctica, *Int. J. Remote Sensing*, 1997, Vol. 18, No. 3, pp. 477 490.
- 6. Masonis S. J., Warren S.G., Gain of the AVHRR visible channel as tracked using bidirectional refectance of Antarctic and Greenland snow, *Int. J. Remote Sensing*, 2001, Vol. 22, No. 8, pp. 1495–1520.
- 7. Tahnk W.R, Coakley J.A. Jr., Improved calibration coefficients for NOAA-12 and NOAA-15 visible and near-IR channels, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 2002, Vol. 19, pp. 1826-1833.
- 8. Warren S.G., Brandt R.E., Hilton P.R., Effect of surface roughness on bidirectional reflectance of Antarctic snow, *J. Geophys. Res.*, 1998, Vol. 103, No. E11, pp. 25789-25807.
- Wu A.S., Xiong X.X., Doelling D.R., Morstad D., Angal A., Bhatt R., Characterization of Terra and Aqua MODIS VIS, NIR, and SWIR Spectral Bands' Calibration Stability, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2013, Vol. 51, No.7, pp. 4330-4338.