

Методика и результаты кросс-калибровки изображений Белорусского космического аппарата и других съемочных систем

О.О. Силук, Л.В. Катковский

Институт прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко БГУ

Минск, 220045, Беларусь

E-mail: volha.siliuk@gmail.com

Кросс-калибровки мультиспектральных систем регистрации изображений земной поверхности основаны на проведении количественных оценок соответствия квазисинхронных измерений, выполненных данными устройствами по одним и тем же районам съемки. В настоящей работе предложена методика поканального сравнения измерений различных сенсоров, основанная на введении поправочных коэффициентов, учитывающих различие параметров сенсоров и условий измерений. Приведены результаты такого рода расчетной кросс-калибровки изображений Белорусского космического аппарата (БКА) и спутников Landsat 8, EO-1 (ALI & Hyperion), авиационного гиперспектрометра AVIRIS. Данные этих аппаратов были выбраны в качестве эталонных ввиду их регулярных корректировок, в том числе, по измерениям подспутниковых полигонов. В результате проведенных кросс-калибровок установлено, что данные, извлекаемые из снимков БКА, являются достоверными, поскольку полученные различия эффективных в пределах сравниваемых каналов СПЭЯ различных спутниковых сенсоров по одним и тем же подстилающим поверхностям при квазисинхронных измерениях находятся в границах суммарных неопределенностей, которые определяются точностью абсолютных предполетных энергетических калибровок сенсоров, методической погрешностью сравнения и различием условий съемки. Анализ изображений последних нескольких лет не выявил тенденции к изменению чувствительности съемочных систем БКА.

Ключевые слова: кросс-калибровка, спутниковая съемка, мультиспектральные изображения, гиперспектральные изображения

Одобрена к печати: 26.04.2016

DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-4-261-270

Введение

Данные дистанционного зондирования Земли используются сегодня во многих сферах научной и хозяйственной деятельности. Выведенный на орбиту в 2012 году Белорусский космический аппарат (БКА) ведет регулярную съемку территорий Земли, материалы которой могут использоваться для решения большого ряда практически важных задач, основанных на результатах тематической обработки изображений. Для извлечения из спутниковых изображений достоверной информации о состоянии объектов земной поверхности необходимо проводить периодическую проверку стабильности характеристик спутниковых сенсоров. Одним из основных способов такой проверки является полетная калибровка аппаратуры по тестовым объектам специально созданных подспутниковых полигонов (Черкашин и др., 2009). Однако подобного рода многоуровневые эксперименты отличаются как сложностью организации, так и значительной стоимостью (Черкашин и др., 2009; Атрошенко и др., 2009). Другим способом контроля качества данных дистанционного зондирования может служить кросс-калибровка двух и более спутниковых систем (Жуков и др., 2011; Meyer, Chander, Helder, 2004).

Кросс-калибровка может состоять либо в сравнении абсолютных значений регистрируемых спектральных яркостей уходящего излучения на верхней границе атмосферы (в случае высокой квазисинхронности измерений одного и того же участка двумя аппаратами), либо в сравнении коэффициентов спектральных яркостей (КСЯ) на верхней границе атмосферы, либо в сравнении спектральных яркостей (или КСЯ)

у поверхности Земли, если для обоих наборов данных проведена атмосферная коррекция на основании имеющейся информации об атмосфере в момент съемки. В любом из этих случаев необходим тщательный учет характеристик съемочных систем (пространственного и спектрального разрешений), подстилающих поверхностей и атмосферы в момент измерений, а также различий условий измерений. Одна из возможных методик кросс-калибровки может строиться следующим образом: на основе измеренных одним из сенсоров значений спектральной плотности энергетической яркости (СПЭЯ) решается обратная задача по восстановлению либо спектральных кривых уходящего излучения на верхней границе атмосферы, либо параметров атмосферы и подстилающей поверхности. Полученные величины используются затем для расчетов величин СПЭЯ (прямая задача), регистрируемых другим сенсором, которые и сравниваются с его реальными измерениями. Такую методику целесообразно использовать, когда на момент измерений имеются данные относительно состояния атмосферы и поверхности, поскольку при использовании небольшого числа широких спектральных каналов получить приемлемое решение обратной задачи без априорной информации невозможно.

В настоящей работе предложена более простая методика сравнения измерений различных сенсоров (Катковский, Силюк, 2015), основанная на введении поправочных коэффициентов, учитывающих различие параметров сенсоров и условий измерений. Приведены результаты такого рода расчетной кросс-калибровки изображений БКА и спутников Landsat 8, EO-1 (ALI & Hyperion), авиационного гиперспектрометра AVIRIS. В табл. 1 и 2 приведены основные характеристики спутников. На рис. 1 показан пример изображений, полученных спутниками БКА и Landsat 8.

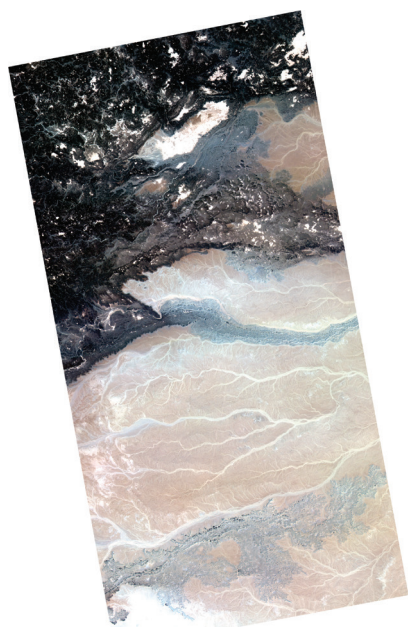
Таблица 1. Основные характеристики гиперспектрометров AVIRIS и Hyperion

<i>Параметры</i>	<i>Значения</i>	
	<i>AVIRIS</i>	<i>Hyperion</i>
Пространственное разрешение, м	20	30
Ширина полосы захвата, км	10,6	7,7
Количество спектральных каналов	224	242
Ширина спектрального канала, нм	9,4/9,7	10
Спектральное покрытие, нм	400-2500	400-2500

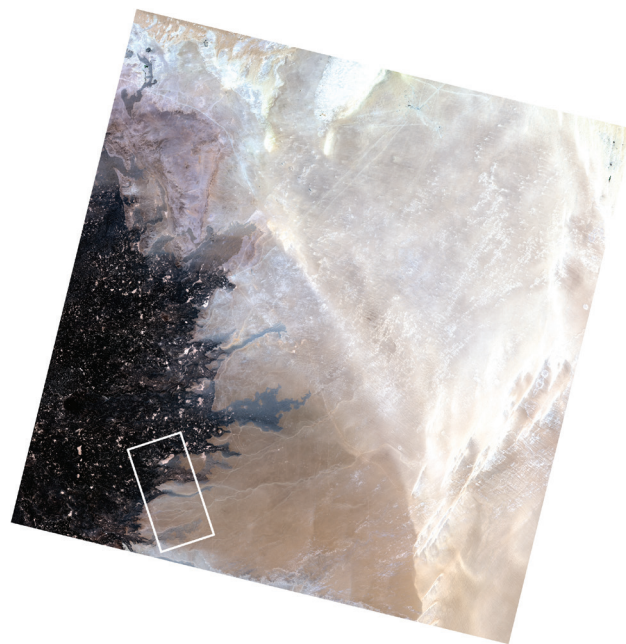
Таблица 2. Основные параметры космических аппаратов Landsat 8, EO-1 ALI и БКА

<i>Параметры</i>	<i>Landsat 8</i>	<i>EO-1 ALI</i>	<i>БКА</i>
<i>Параметры орбиты</i>			
Рабочая орбита	Солнечно-синхронная	Солнечно-синхронная	Солнечно-синхронная
Высота орбиты, км	705	705	510
Наклонение орбиты, °	98,2	98,21	98
Период обращения, мин	98,9	98,7	94,75

Характеристики мультиспектральных съемочных систем			
Спектральные диапазоны, мкм	blue: 0,45-0,52 green: 0,53-0,60 red: 0,63-0,68	MS-1: 0,450-0,515 MS-2: 0,525-0,605 MS-3: 0,630-0,690	band 1: 0,46-0,52 band 2: 0,51-0,60 band 3: 0,63-0,69
Разрешение на местности, м	30	30	10,5
Полоса захвата, км	185	37	23



а)



б)

Рис. 1. Снимки Ливийской пустыни, зарегистрированные спутниками БКА (а) и Landsat 8 (б). На изображении Landsat 8 белой рамкой выделено положение кадра БКА

Методика кросс-калибровки мультиспектральных съемочных систем с близкими спектральными каналами

Для поиска спутниковых данных, находящихся в свободном доступе, можно воспользоваться специальными серверами для просмотра и получения спутниковой информации (Катковский, Силюк, 2015; Черкашин и др., 2009; Chrien et al., 2000), откуда можно загрузить изображения различного уровня обработки на искомую дату и территорию.

Исходные снимки, получаемые со спутников, содержат целочисленные цифровые значения (DN – digital numbers), принадлежащие определенному для каждого сенсора динамическому диапазону и характеризующие излучение на верхней границе атмосферы в пределах пикселя. Для сопоставления данных различных систем такие «сырые» данные пересчитываются в эффективные значения СПЭЯ с использованием, как правило, линейного уравнения, коэффициенты которого (калибровочные коэффициенты) определяются при проведении наземных предполетных спектрально-энергетических калибровок съемочных систем и периодически уточняются по результатам повторных калибровок в процессе

эксплуатации. Для каждого канала сенсора спутника, осуществляющего съемку, имеется своя пара калибровочных коэффициентов, с помощью которых значения каждого пикселя снимка переводятся в эффективное для каждого канала значение СПЭЯ, определяемое следующим образом:

$$B = \int_0^{\infty} S(\lambda)B(\lambda)d\lambda / \int_0^{\infty} S(\lambda)d\lambda. \quad (1)$$

Здесь $S(\lambda)$ – функция спектральной чувствительности канала, $B(\lambda)$ – спектр уходящего излучения на верхней границе атмосферы.

Для получения указанного значения эффективной СПЭЯ (в Вт/(м²×ср×мкм)) для любого из каналов используется формула следующего вида: $B = c_1DN + c_0$, где c_1 , c_0 – калибровочные коэффициенты данного канала изображения, DN – цифровое значение пикселя изображения, B – получаемое значение СПЭЯ пикселя. Следующий этап работы со снимками состоит в переводе по известным калибровочным коэффициентам цифровых значений пикселей в единицы СПЭЯ.

Далее, для повышения точности сопоставления данных двух аппаратов необходимо учесть имеющиеся различия относительных спектральных чувствительностей, положений и ширин спектральных каналов сравниваемых съемочных систем. Эти различия иллюстрируются на *рис. 2*, а также в *табл. 1*, где приведены основные характеристики БКА, Landsat 8, EO-1.

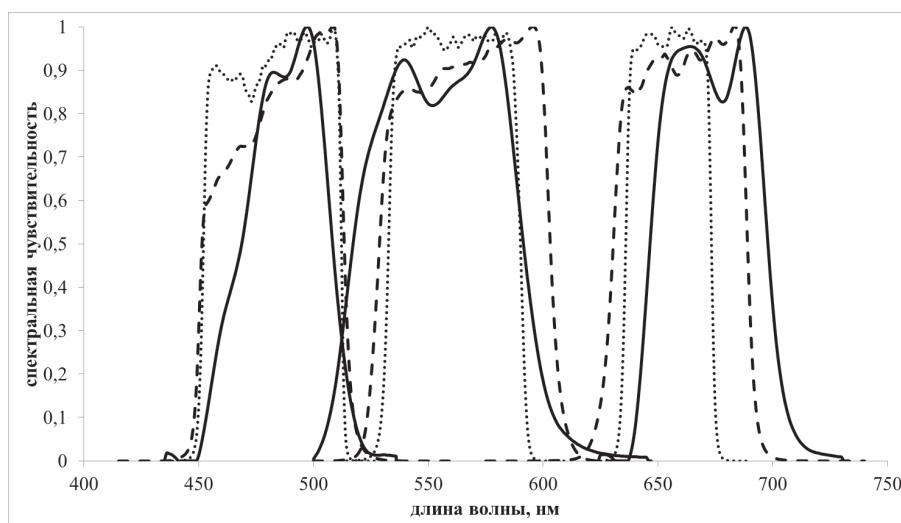


Рис. 2. Спектральные чувствительности каналов спутниковых аппаратов: красный - каналы EO-1 ALI (MS-1, MS-2, MS-3), синий - каналы Landsat 8 (blue, green, red), зеленый - каналы БКА (band 1, band 2, band 3)

Как видно из формулы 1, эффективная СПЭЯ зависит не только от чувствительности спектрального канала, но и спектра излучения на верхней границе атмосферы. Поскольку спектр восходящего излучения поверхности при квазисинхронных измерениях неизвестен, то для учета возникающих по указанным причинам (чувствительность канала и спектр излучения) различий рассчитывался отклик в каждом из сравниваемых каналов съемочных систем на типичный спектр рассматриваемой подстилающей

поверхности (тип поверхности определяется пользователем по изображениям или карте) на верхней границе атмосферы по формуле 1, где в качестве $B(\lambda)$ использовались спектры отражения, зарегистрированные спетрорадиометром Фотоспектральной системы (ФСС, разработка НИИПФП им. А.Н. Севченко) с борта Международной космической станции по тем же или аналогичным поверхностям. Отношение рассчитанных откликов для пары сравниваемых каналов (формула 2) определяет поправочный коэффициент, используемый далее в качестве корректирующего множителя при сопоставлении СПЭЯ поверхностей двух систем:

$$k_1 = B_{sat1} / B_{sat2} . \quad (2)$$

Кроме того, для повышения точности результатов сравнения снимков были учтены различия условий освещения. Измеряемая спутником спектральная яркость излучения зависит от зенитных углов Солнца (θ_{sat1} и θ_{sat2}), которые отличаются при съемках данной подстилающей поверхности разными спутниками из-за различия во времени съемки. Поправочный коэффициент рассчитывается из формулы: $k_2 = E_{sat1} / E_{sat2} = \cos \theta_{sat1} / \cos \theta_{sat2}$, где E_{sat1} и E_{sat2} обозначают освещенности, соответствующие времени съемки каждого из спутников.

Для сопоставления измерений и анализа выбираются общие участки с однородной поверхностью в пределах перекрывающихся пространственных зон съемки обоими аппаратами. Учитывая различные пространственные разрешения и ориентацию снимков, проводилось усреднение измеренных каждой системой значений СПЭЯ по приблизительно совпадающим пространственным областям (различным группам пикселей каждого изображения). К полученным значениям СПЭЯ применялись рассчитанные ранее поправочные коэффициенты, и находились искомые отношения измеряемых разными съемочными системами эффективных СПЭЯ.

Данная методика вначале была протестирована на изображениях, полученных мультиспектральными съемочными системами аппаратов Landsat 7 и EO-1. Кросс-калибровка этих же снимков приведена в работе (Meyer, Chander, Helder, 2004). Алгоритм кросс-калибровки в указанной работе отличен от нашего, в нем используются наземные измерения и расчеты излучения на верхней границе атмосферы по программам теории переноса излучения. Результаты кросс-калибровки по описанной в (Meyer, Chander, Helder, 2004) и нашей методикам различаются незначительно (табл. 3).

Таблица 3. Результаты сравнения методик

<i>Методика</i>	<i>Значение погрешности в канале</i>		
	<i>R</i>	<i>G</i>	<i>B</i>
Dave Meyer, Gyanesh Chander, Dennis Helder. Cross-Calibration of the Landsat 7 ETM+ and EO-1 ALI sensors	~2%	~2%	~2%
Используемая методика	~9%	~3%	~4%

Методика кросс-калибровки мультиспектральной и гиперспектральной съемочных систем

Для перевода цифровых значений пикселей гиперспектральных изображений, получаемых такими аппаратами как AVIRIS и Nuregon, в единицы Вт/(м²×ср×мкм) вместо пары калибровочных коэффициентов используется только один коэффициент, называемый «gain», на который необходимо разделить исходное изображение.

Помимо этого, при кросс-калибровке БКА и гиперспектральных съемочных систем для каждого канала БКА необходимо учитывать среднее значение эффективной СПЭЯ по целому ряду смежных каналов гиперспектрального сенсора (рис. 3).

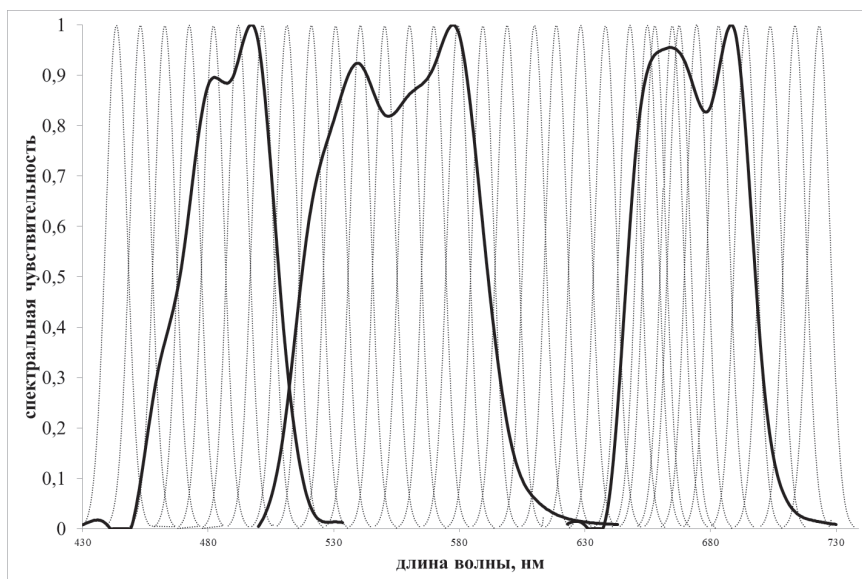


Рис. 3. Спектральные чувствительности каналов БКА (band 1, band 2, band 3) и каналов AVIRIS (band 9-band 41)

В данном случае необходимо просуммировать вклады каналов гиперспектрального сенсора, примерно соответствующих по суммарной ширине спектрального диапазона каждому из трех мультиспектральных каналов БКА, что можно представить формально следующим выражением:

$$B_j = k_{1j} \sum_{i=n_{j1}}^{n_{j2}} B_i^{hyp} / (n_{j2} - n_{j1}),$$

где B_j – усредненное по каналам и скорректированное значение эффективной СПЭЯ гиперспектрометра; n_{j1}, n_{j2} – номера первого и последнего каналов гиперспектрального сенсора, соответствующих границам j -го канала БКА; $j=1,2,3$, что соответствует каналам БКА band 1, band 2, band 3; B_i^{hyp} – измеренное значение СПЭЯ выбранного участка подстилающей поверхности i -го канала гиперспектральной съемочной системы, поправочный коэффициент k_{1i} , рассчитывается по формуле, аналогичной формуле 2:

$$k_{1j} = \bar{B}_j^{БКА} \left[\sum_{i=n_{j1}}^{n_{j2}} \bar{B}_i^{hyp} / (n_{j2} - n_{j1}) \right]^{-1}, \text{ в которой } \bar{B}_j^{БКА} \text{ и } \bar{B}_i^{hyp} - \text{эффективные СПЭЯ, рас-}$$

считанные для j -го канала БКА и i -го канала гиперспектрометра соответственно с использованием одного и того же типичного спектра измеряемой подстилающей поверхности.

В табл. 4 приведены значения n_{j1}, n_{j2} для AVIRIS и Hyperion. Для удобства дальнейшего анализа введем следующие обозначения для групп соседних каналов гиперспектрометров, соответствующих каналам БКА. Обозначения для AVIRIS: AV1 (соответствует band1), AV2 (соотв. band2), AV3 (соотв. band3). Обозначения для Hyperion: Hup1 (соответствует band1), Hup2 (соотв. band2), Hup3 (соотв. band3).

Таблица 4. Номера каналов гиперспектральных сенсоров, соответствующие границам каналов БКА

Канал БКА	Hyperion		AVIRIS	
	n_{j1}	n_{j2}	n_{j1}	n_{j2}
band 1	9	19	9	17
band 2	15	29	15	30
band 3	29	38	27	40

Результаты

Результаты сравнения измерений СПЭЯ в спектральных каналах БКА и Landsat 8, БКА и AVIRIS, БКА и EO-1 представлены в табл. 5–7. Отношения итоговых СПЭЯ сравниваемых систем округлены до двух десятичных знаков.

Таким образом, в результате проделанных кросс-калибровок можно сделать вывод, что данные, извлекаемые из снимков БКА, являются достоверными, поскольку полученные различия эффективных СПЭЯ различных спутниковых сенсоров по одним и тем же подстилающим поверхностям при квазисинхронных измерениях находятся в пределах суммарных неопределенностей, определяемых точностью абсолютных энергетических калибровок сенсоров, погрешность которых составляет порядка 5% для БКА (Беляев и др., 2012) и не более 5% для других съемочных систем (Mendenhall, Lencioni, Evans, 2005; Markham et al., 2014; Chrien et al., 2000), а оставшаяся часть погрешности может объясняться методической погрешностью сравнения и различием условий съемки.

Таблица 5. Результаты кросс-калибровки данных БКА и Landsat 8

Место, дата и время съемки	Тип подстилающей поверхности	Относительные значения разности СПЭЯ в каналах, %		
		band 1/blue	band 2/green	band 3/red
Ливия, 12.09.2013 БКА: 10:10:56 Landsat 8: 9:16:06	Пустыня	5	5	2

Нижний Новгород, 18.04.2014 БКА: 8:03:57 Landsat 8: 8:04:15	Лес	10	5	3
	Поле	11	9	14
Санкт-Петербург, 18.11.2014 БКА: 8:54:04 Landsat 8: 9:05:32	Поле	15	5	15
	Лес	13	2	10
Камчатка, 09.06.2015 БКА: 00:29:50 Landsat 8: 00:32:24	Снег	17	18	20
О. Новая Земля, 02.08.2015 БКА: 5:07:42 Landsat 8: 08:04:10	Снег	3	3	6

Таблица 6. Результаты кросс-калибровки данных БКА и AVIRIS

<i>Место, дата и время съемки</i>	<i>Тип подстилающей поверхности</i>	<i>Относительные значения разности СПЭЯ в каналах, %</i>		
		<i>band 1/AV1</i>	<i>band 2/AV2</i>	<i>band 3/AV3</i>
Калифорния, США, 25.11.2013 БКА: 19:12:16 AVIRIS: 20:50:00	Горы	2	15	14
	Горы	1	10	12
	Поля	13	12	7

Таблица 7. Результаты кросс-калибровки данных БКА и EO-1

<i>Место, дата и время съемки</i>	<i>Тип подстилающей поверхности</i>	<i>Относительные значения разности СПЭЯ в каналах, %</i>					
		<i>БКА/ALI</i>			<i>БКА/Hyperion</i>		
		<i>band 1/MS-1</i>	<i>band 2/MS-2</i>	<i>band 3/MS-3</i>	<i>band 1/Hyp1</i>	<i>band 2/Hyp2</i>	<i>band 3/Hyp3</i>
Палестина, 25.10.2014 БКА: 9:05:00 EO-1: 7:06:41	Песок	2	7	13	11	6	9
Иордания, 24.07.2015 БКА: 9:10:00 EO-1: 6:31:25	Песок	3	6	3			

Анализ изображений последних нескольких лет не выявил тенденции к изменению чувствительности съемочных систем БКА, а это значит, что они работают стабильно и дополнительные калибровки в настоящее время не требуются.

Литература

1. Атрошенко Л.М., Беляев Б.И., Горобец Н.Н., Катковский Л.В. Состав реперов и калибровочных средств оптического и радиодиапазонов подспутниковых полигонов // Четвертый Белорусский космический конгресс. Материалы конгресса. Минск, 2009. Т. 2. С. 20–24.
2. Беляев Ю.В., Крот Ю.А., Веллер В.В., Цикман И.М., Сикорский Д.А., Зайцева В.А., Какшинский Ф.А., Панфилов А.С. Схемы и методики передачи единицы СПЭЯ при калибровке аппаратуры высокого пространственного разрешения и большой апертуры // Десятая всероссийская открытая ежегодная

- конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Сб. тезисов конференции. Москва: ИКИ РАН, 2012.
3. Жуков Б.С., Кондратьева Т.В., Полянский И.В., Пермитина Л.И. Полетная радиометрическая кросс-калибровка комплекса многозональной спутниковой съемки на КА «Метеор-М» №1 по спектрорадиометру MODIS на КА Terra // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 3. С. 113–119.
 4. Катковский Л.В., Силиук О.О. Кросс-калибровка съемочных систем Белорусского космического аппарата и Landsat 8 // Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния: материалы III международной научно-практической конференции. Минск, 2015. С. 62–64.
 5. Черкашин А.К., Горобец Н.Н., Смирнов С.И., Атрошенко Л.М., Попов М.А., Лялько В.И., Катковский Л.В., Сафронова Л.П., Костикин С.И. Принципы организации и обслуживания международной системы подспутниковых полигонов // Четвертый Белорусский космический конгресс. Материалы конгресса. Минск, 2009. Т. 2. С. 12–19.
 6. Chrien T., Green R., Pavri B., Wall J. Calibration Validation of the AVIRIS Portable Radiance Standard // AVIRIS Workshop Proc., 2000.
 7. Markham B., Barsi J., Kvaran G., Ong L., Kaita E., Biggar S., Czaplá-Myers J., Mishra N., Helder D. Landsat 8 Operational Land Imager Radiometric Calibration and Stability // Remote Sensing. 2014. Vol. 6. Issue 12. P. 12275–12308
 8. Mendenhall J.A., Lencioni D.E., Evans J.B. Spectral and Radiometric Calibration of the Advanced Land Imager // Lincoln Laboratory Journal. 2005. Vol. 15. No. 2. P. 207–224.
 9. Meyer D., Chander G., Helder D. Cross-Calibration of the Landsat 7 ETM+ and EO-1 ALI sensors // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2004. Vol. 42. No. 12. P. 2821–2831.

Methods and results of image cross-calibration of the Belarusian satellite and other sensors

O.O. Siliuk, L.V. Katkovskii

*A.N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems of Belarussian State University
Minsk 220045, Belarus
E-mail: volha.siliuk@gmail.com*

Cross-calibration of satellite multispectral imaging systems is based on quantitative estimation of compliance of quasi-synchronous measures made by these sensors for the same underlying surface. The paper describes a method of channel-comparison measurements of different sensors using correction coefficients that allow difference between sensor parameters and measurement conditions. Presented are the results of radiometric cross-calibration of images obtained in closest channels of Belarusian satellite and Landsat 8, EO-1 (ALI & Hyperion) and AVIRIS imaging systems. The data of these sensors were chosen as a sample because of their regular adjustments, including subsatellite test sites measurements. As a result of cross-calibration it was established that the data of Belarusian satellite is reliable; this is because the differences of the satellite sensors (that are effective within the compared channels of radiance by the same underlying surface at quasi-synchronous measures) received from the research are within total uncertainties; these are determined by accuracy of absolute preflight energy calibration of the sensors, methodological error of comparison and difference of measurement conditions. The analysis of the images of the past few years did not reveal any tendencies of change in sensitivity of imaging systems of the Belarusian satellite.

Keywords: cross-calibration, satellite imagery, multispectral images, hyperspectral images

*Accepted: 26.04.2016
DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-4-261-270*

References

1. Atroshenko L.M., Belyaev B.I., Gorobets N.N., Katkovskii L.V., Sostav reperov i kalibrovочnykh sredstv opticheskogo i radiodapazonov podsputnikovыkh poligonov (The composition of frames and calibration aids of optical and microwave range of subsatellite test sites), *IV Belorusskii kosmicheskii congress* (IV Belarusian Space Congress), Minsk, 2009, Vol. 2, pp. 20–24.
2. Belyaev Y.V., Krot Y.A., Veller V.V., Tsikman I.M., Sikorskii D.A., Zaitseva V.A., Kakshinskii F.A., Panfilov A.S. Skhemy i metodiki peredachi edinitiy SPEYa pri kalibrovke apparatury vysokogo prostranstvennogo razresheniya i bol'shoi apertury (Spectral brightness passing schemes and methods of high-resolution and large aperture equipment calibration), *10 konf. "Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa"* (The 10th all-Russia Open Conference "Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space"), Moscow, 2012, Book of Abstracts.

3. Zhukov B.S., Kondrat'eva T.V., Polyanskii I.V., Permitina L.I., Poletnaya radiometricheskaya kross-kalibrovka kompleksa mnogoazonal'noi sputnikovoi s'emki na KA «Meteor-M» №1 po spektrometriu MODIS na KA Terra (In-flight radiometric cross-calibration of Multispectral Satellite Imaging System on-board Meteor-M No. 1 relative to spectroradiometer MODIS on-board Terra), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2011, Vol. 8, No. 3, pp. 113–119.
4. Katkovskii L.V., Silyuk O.O., Kross-kalibrovka s'emochnykh sistem Belorusskogo kosmicheskogo apparata i Landsat 8 (Cross-calibration of the Belarusian satellite and Landsat 8 sensors), *Prikladnye problemy optiki, informatiki, radiofiziki i fiziki kondensirovannogo sostoyaniya* (Applied Problems of Optics, Physics and Spectroscopy), Minsk, 2015, pp. 62–64.
5. Cherkashin A.K., Gorobets N.N., Smirnov S.I., Atroshenko L.M., Popov M.A., Lyal'ko V.I., Katkovskii L.V., Safronova L.P., Kostshkin S.I., Printsipy organizatsii i obsluzhivaniya mezhdunarodnoi sistemy podsputnikovyykh poligonov (Principles of organization and maintenance of the international system of subsatellite test sites), *VI Belorusskii kosmicheskii kongress* (IV Belarusian Space Congress), Minsk, 2009, Vol. 2, pp. 12–19.
6. Chrien T., Green R., Pavri B., Wall J. Calibration Validation of the AVIRIS Portable Radiance Standard, *AVIRIS Workshop Proc.*, 2000.
7. Markham B., Barsi J., Kvaran G., Ong L., Kaita E., Biggar S., Czapla-Myers J., Mishra N., Helder D. Landsat 8 Operational Land Imager Radiometric Calibration and Stability, *Remote Sensing*, 2014, Vol. 6, Issue 12, pp. 12275–12308.
8. Mendenhall J.A., Lencioni D.E., Evans J.B. Spectral and Radiometric Calibration of the Advanced Land Imager, *Lincoln Laboratory Journal*, 2005, Vol. 15, No. 2, pp. 207–224.
9. Meyer D., Chander G., Helder D., Cross-Calibration of the Landsat 7 ETM+ and EO-1 ALI sensors, *IEEE Transactions On Geoscience And Remote Sensing*, 2004, Vol. 42, No. 12, pp. 2821–2831.