Оценивание спектральной чувствительности многоспектральной съёмочной аппаратуры спутниковой системы "Сич-2" по наземным спектрометрическим измерениям

М.А. Попов¹, С.А. Станкевич¹, Я.И. Зелык², С.В. Шкляр¹, О.В. Семенив², С.С. Дугин¹, Б.С. Жуков³

¹ Научный центр аэрокосмических исследований Земли ИГН НАН Украины Киев, Украина E-mail: st@casre.kiev.ua ² Институт космических исследований НАН и ГКА Украины, Киев, Украина E-mail: adapt09@gmail.com ³ Институт космических исследований РАН, Москва, Россия E-mail: bzhukov@mail.ru

Исследование является составной частью научно-методических работ, направленных на обустройство украинского контрольно-калибровочного полигона для многоспектральных спутниковых систем дистанционного зондирования Земли оптического диапазона. Изложен метод оценки спектральной чувствительности многоспектральной съёмочной аппаратуры (МСА) спутниковой системы "Сич-2" по результатам космических съёмок тестовых объектов евпаторийского контрольно-калибровочного полигона Государственного космического агентства Украины. Предложена специальная параметризация функций спектральной чувствительности МСА, позволяющая решить систему уравнений переноса оптического излучения аналитически. Детально описан порядок выполнения прецизионных наземных измерений спектрального отражения поверхности площадных тестовых объектов на евпаторийском контрольнокалибровочном полигоне в июне 2012 года. Обсуждены результаты оценивания спектральной чувствительности МСА спутниковой системы "Сич-2" совместно по реальным снимкам и наземным спектрометрическим измерениям. Проведена статистическая оценка точности определения спектральной чувствительности МСА спутниковой системы "Сич-2". Выявлено систематическое смещение центральных длин волн в длинноволновую часть спектра и систематическое увеличение ширины спектральных диапазонов по сравнению с номинальными значениями. Продемонстрирована возможность кросскалибровки МСА спутниковых систем "Сич-2" (Украина) и "Метеор-М" (Россия) по одним и тем же тестовым объектам калибровочных полигонов на территории Украины.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, спутниковая система, многоспектральная съёмочная аппаратура, спектральная чувствительность, калибровка, наземный тестовый объект.

Введение

Дистанционные измерения и наблюдения широко применяются для исследования самых разных объектов и явлений на поверхности Земли. Спектр решаемых тематических задач дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) постоянно расширяется, при этом к достоверности измерений с борта воздушных и космических платформ предъявляются всё более жёсткие требования (Лялько и др., 2006). Одно из главных условий обеспечения достоверности получаемых результатов – наличие максимально точной информации о функциях спектральной чувствительности съёмочной аппаратуры в каждом из ее рабочих спектральных диапазонов. Получить такую информацию без знания оптико-спектральных характеристик соответствующих объектов, полученных в полевых (наземных) или лабораторных условиях, практически невозможно. В данной работе рассматривается проблема оценивания спектральной чувствительности многоспектральной съёмочной аппаратуры (MCA) спутниковой системы "Сич-2" на основе наземных спектрометрических измерений.

Исследование выполнено в рамках плана научно-методических работ, направленных на обустройство контрольно-калибровочного полигона для многоспектральных спутниковых систем ДЗЗ оптического диапазона в Украине.

Задача

Как известно, спектральная чувствительность $S(\lambda)$ МСА определяется экспериментально в лабораторных условиях перед запуском спутниковой системы путём измерения зависимости выходного сигнала фотоприёмного устройства от величины входного оптического сигнала с известным спектральным распределением интенсивности (Ваваев и др., 2009). В условиях практического применения спутниковой системы ДЗЗ спектральные характеристики МСА могут отличаться от лабораторно измеренных, поэтому они должны периодически оцениваться в условиях космического полёта. Такие оценки базируются, с одной стороны, на физических моделях переноса оптического излучения, а с другой – на результатах обработки получаемых в полёте изображений специально определённых наземных тестовых объектов (TO).

Спектральная чувствительность МСА используется при определении спектральной энергетической яркости оптического излучения *L_j* в рабочем спектральном диапазоне (Станкевич, 2008):

$$L_{j} = \int_{0}^{\infty} L(\lambda) S_{j}(\lambda) d\lambda , \qquad (1)$$

где $L(\lambda)$ – спектральная плотность энергетической яркости оптического излучения на входе фотоприёмного устройства, Bt/(м²·мкм·ср); *j* – номер рабочего спектрального диапазона.

Без знания функции спектральной чувствительности $S_j(\lambda)$ практически невозможно выполнить как радиометрическую калибровку сенсора, так и радиометрическую коррекцию регистрируемых спутниковых изображений. Отметим, что радиометрическая коррекция является одною из обязательных операций, выполняемых при приведении "сырых" спутниковых данных ДЗЗ оптического диапазона к форме стандартных калиброванных информационных продуктов уровня 1В, когда зарегистрированный уровень сигнала в каждом пикселе отображается в соответствующее значение спектральной энергетической яркости на входе MCA (Justice et al., 2000).

Метод

В общем случае определение спектральной чувствительности оптико-электронной съёмочной аппаратуры по результатам съёмки ТО даже с точно известной спектральной отражательной характеристикой является математически некорректной задачей (Станкевич, 1999). В самом деле, пусть МСА имеет спектральную чувствительность $S_j(\lambda)$ в рабочем спектральном диапазоне *j*. Если на поверхности *i*-го объекта съёмки обеспечивается спектральная плотность энергетической облучённости Солнцем $E_0(\lambda)$, то спектральная яркость зарегистрированного оптического сигнала (1) составит:

$$L_{ij} = \frac{1}{\pi} \int_{0}^{\infty} E_0(\lambda) \,\rho_i(\lambda) \,\tau(\lambda) \,S_j(\lambda) \,d\lambda + L_{0j} \quad , \tag{2}$$

где $\rho_i(\lambda)$ – спектральный коэффициент отражения *i*-го объекта съёмки, $\tau(\lambda)$ – спектральный коэффициент пропускания атмосферы, L_{0j} – энергетическая яркость атмосферной дымки в рабочем спектральном диапазоне (Крючков, 2002).

Переход к спектральному отражению $\rho_i(\lambda)$ тестовых объектов от спутниковых измерений спектральной яркости на входе фотоприёмного устройства требует использования результатов решения уравнения переноса излучения (Schowengerdt, 2007):

$$\rho_{i}(\lambda) = \frac{\pi (L(\lambda) - L_{0})}{\tau(\lambda) \exp\left[\frac{\ln \tau(\lambda)}{\sin \theta}\right] E_{0}(\lambda) \cos\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right)} , \qquad (3)$$

где θ – угловая высота Солнца над горизонтом во время съёмки.

Поскольку реальная ширина рабочих спектральных диапазонов МСА не слишком велика, то спектральную энергетическую облучённость $E_j = \frac{1}{\Delta \lambda_j} \int_{\lambda_j} E_0(\lambda) d\lambda$ и спектраль-

ное пропускание атмосферы $\tau_j = \frac{1}{\Delta \lambda_j} \int_{\lambda_i} \tau(\lambda) d\lambda$ в первом приближении можно считать по-

стоянными. Тогда

$$L_{ij} = \frac{\tau_j E_j}{\pi} \int_0^\infty \rho_i(\lambda) S_j(\lambda) d\lambda + L_{0j} \quad .$$
(4)

Для известных $\rho_i(\lambda)$ и L_{0j} из (3) невозможно восстановить произвольную функцию $S_j(\lambda)$ по измеренным значениям L_{ij} . Решение данной некорректной задачи предлагается искать для специально параметризованных функций $S_j(\lambda)$ и $\rho_i(\lambda)$. При удачном подборе вида их параметризации уравнение (4) можно решить аналитически. В частности, функция спектральной чувствительности может быть аппроксимирована гауссоидой с параметрами k_j , λ_j и σ_j :

$$S_j(\lambda) = k_j \exp\left[-\frac{(\lambda - \lambda_j)^2}{2\sigma_j^2}\right] \quad .$$
(5)

Если подобрать ТО с почти линейной спектральной характеристикой отражения во всём рабочем спектральном диапазоне, как показано на *puc*. *1*,

$$\rho_i(\lambda) \approx a_{ij}\,\lambda + b_{ij} \quad , \tag{6}$$

где *a*_{ij} и *b*_{ij} – коэффициенты линейной аппроксимации, тогда с учётом, что

$$\int_{0}^{\infty} \rho_{i}(\lambda) S_{j}(\lambda) d\lambda \approx k_{j} \int_{-\infty}^{\infty} (a_{ij}\lambda + b_{ij}) \exp\left[-\frac{(\lambda - \lambda_{j})^{2}}{2\sigma_{j}^{2}}\right] d\lambda = \sqrt{2\pi} k_{j} \sigma_{j} (a_{ij}\lambda_{j} + b_{ij}) , \qquad (7)$$

параметры гауссоиды *k_j*, *σ_j*, *λ_j* можно найти методом наименьших квадратов. Минимизируем сумму квадратов невязок:

$$\sum_{i=1}^{n} \left[\sqrt{2\pi} k_j \sigma_j (a_{ij}\lambda_j + b_j) - \frac{\pi (L_{ij} - L_{0j})}{E_j \tau_j} \right]^2 \to \min .$$
(8)



Рис. 1. К параметризации спектральных характеристик многоспектральной съёмочной аппаратуры и тестового объекта

Оценка параметров гауссоиды согласно (8) удовлетворяет системе уравнений:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{n} \left(\sqrt{2\pi} k_{j} \sigma_{j} \lambda_{j} a_{ij} + \sqrt{2\pi} k_{j} \sigma_{j} b_{ij} - \frac{\pi (L_{ij} - L_{0j})}{E_{j} \tau_{j}} \right) a_{ij} = 0 \\ \sum_{i=1}^{n} \left(\sqrt{2\pi} k_{j} \sigma_{j} \lambda_{j} a_{ij} + \sqrt{2\pi} k_{j} \sigma_{j} b_{ij} - \frac{\pi (L_{ij} - L_{0j})}{E_{j} \tau_{j}} \right) b_{ij} = 0 \end{cases}$$
(9)

Решение системы (9) имеет вид:

$$\binom{k_{j} \sigma_{j}}{k_{j} \sigma_{j} \lambda_{j}} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^{n} b_{ij}^{2} & \sum_{i=1}^{n} a_{ij} b_{ij} \\ \sum_{i=1}^{n} a_{ij} b_{ij} & \sum_{i=1}^{n} a_{ij}^{2} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^{n} b_{ij} & \frac{\pi(L_{ij} - L_{0j})}{E_{j} \tau_{j}} \\ \sum_{i=1}^{n} a_{ij} & \frac{\pi(L_{ij} - L_{0j})}{E_{j} \tau_{j}} \end{pmatrix}.$$
(10)

Масштабный коэффициент k_j должен определяться из некоторых дополнительных физических соображений, например энергетических, поскольку решение (10) обеспечивает получение только значения произведения $k_j \sigma_j$ (Попов и др., 2012).

Примерами природных и искусственных покрытий, спектры которых приблизительно линейны в пределах рабочих спектральных диапазонов МСА украинской спутниковой системы ДЗЗ "Сич-2" (*табл. 1*), являются открытые почвы, песок, асфальт, бетон, стекло, сухая растительность, обработанное дерево, неокрашенный алюминий, свежий снег, лёд, чистая вода (Кринов, 1946; Clark, 2007).

Устройство и характеристики	Значение	
Многоспектральное сканирующее устройство (МСУ)		
Количество рабочих спектральных диапазонов	4	
Границы рабочих спектральных диапазонов по уровню 0,5, мкм: панхроматический зелёный красный ближний инфракрасный	$(0,51-0,90)\pm 0,015$ $(0,51-0,59)\pm 0,015$ $(0,61-0,68)\pm 0,015$ $(0,80-0,89)\pm 0,015$	
Проекция пиксела фотоприёмного устройства на поверхность Земли (при съёмке в надир с высоты 668 км), м	7,8	
Ширина полосы съёмки на поверхности Земли (при съёмке в надир с высоты 668 км), км	46,6±0,5	
Сканер среднего инфракрасного диапазона (ССИК)		
Границы рабочего спектрального диапазона по уровню 0,5, мкм	от 1,51±0,01 до 1,70±0,04	
Проекция пиксела фотоприёмного устройства на поверхность Земли (при съёмке в надир с высоты 668 км), м	39,5	
Проекция шага строк сканирования на поверхность Земли (при съёмке в надир с высоты 668 км), м	46	
Ширина полосы съёмки на поверхности Земли (при съёмке в надир с высоты 668 км), км	55,5±0,5	
Отношение "сигнал/шум" (при альбедо земной поверхности 0,8, угле места Солнца 70° и коэффициенте пропускания атмосферы 0,8)	100	

Таблица 1. Основные технические характеристики МСА спутниковой системы "Сич-2"

Результаты

Изложенный метод определения спектральной чувствительности МСА проверялся на реальных многоспектральных спутниковых снимках территории евпаторийского подспутникового контрольно-калибровочного полигона (ККП) Государственного космического агентства (ГКА) Украины, полученных спутниковой системой "Сич-2" в июне 2012 г. (*рис. 2*). Также использовались многоспектральные спутниковые снимки "Сич-2" территории ККП, полученные с 4 по 19 сентября этого же года, и многоспектральный снимок, полученный МСА МСУ-100, входящей в состав комплекса многозональной спутниковой съемки (КМСС) российской спутниковой системы "Метеор-М" № 1 за 13 июня 2012 г. (*рис. 3*).



Рис. 2. Многоспектральные спутниковые изображения МСА "Сич-2": Евпатория, Крым, 03.06.2012 (а) и 25.06.2012 (б), пространственное разрешение 8 м



Рис. 3. Многоспектральное спутниковое изображение МСА КМСС на КА "Метеор-М" № 1: Евпатория, Крым, 13.06.2012, пространственное разрешение 54 м

Для оценивания спектральной чувствительности МСА спутниковой системы "Сич-2" использовались данные наземных спектрометрических измерений спектральных характеристик отражения ТО ККП при помощи прецизионного полевого спектрометра FieldSpec 3FR производства американской компании Analytical Spectral Devices, которые проводились в период с 14 по 21 июня 2012 г. – практически синхронно со спутниковой съёмкой. Спецификации спектрометра приведены в *табл. 2*.

Характеристика	Значение
Диапазон спектральных измерений, нм	350 - 2500
Интервал спектральных отсчётов, нм: в диапазоне 350 – 1000 нм в диапазоне 1000 – 2500 нм	1,4 2,0
Спектральное разрешение (ширина на половине максимума – FWHM), нм: на длине волны 700 нм на длине волны 1400 нм на длине волны 2100 нм	3 10 12
Угол поля зрения, град.	8; 18; 25
Габариты, мм	127×356×292

Таблица 2. Основные технические характеристики спектрометра FieldSpec 3FR

Спектрометрические измерения выполнялись в 69 точках площадных TO, из которых для дальнейшей обработки был отобран 61 спектр отражения природных и искусственных покрытий в диапазоне длин волн 0,35-2,5 мкм. Причиной отбраковки ряда измерений послужили большие дисперсии, значительно превышающие их значения в остальных сериях, а также существенные нелинейности полученных спектральных кривых отражения. Размещение TO в районе исследований показано на картосхеме *рис. 4*.



Рис. 4. Картосхема размещения на территории ККП объектов спектрометрических измерений в период с 14 по 21 июня 2012 г.

Для каждого ТО спектральные измерения осуществлялись не менее, чем в 10-ти точках, при этом в каждой точке выполнялось не менее 50-ти измерений (*puc. 5, 6*). Зависимости спектрального коэффициента отражения от длины волны усреднялись по поверхности объекта. Геопривязка местоположения точек измерений выполнялась при помощи приёмника GPS.



Рис. 5. Тестовый участок GPS 573 – крыша здания, битумное покрытие



Рис. 6. Тестовый участок GPS 581 – плац, бетонное покрытие



Рис. 7. Спектральные характеристики тестовых участков, линеаризованные в рабочих спектральных диапазонах MCA "Сич-2": а – тестовый участок GPS 573; б – тестовый участок GPS 581

Полученные спектральные характеристики ТО линеаризовались методом наименьших квадратов в границах каждого рабочего спектрального диапазона МСА спутниковой системы "Сич-2". На *рис.* 7 приведены примеры линеаризации соответствующих фрагментов спектров отражения тестовых участков *рис.* 5 и *рис.* 6. Те ТО, у которых наблюдались завышенные значения среднеквадратической ошибки линейной аппроксимации, исключались из анализа в соответствующих спектральных диапазонах. Далее по (9) рассчитывались параметры гауссоид $\{\lambda_j, k_j, \sigma_j\}$ функций спектральной чувствительности для каждого рабочего спектрального диапазона МСА системы "Сич-2".

Выполнена статистическая оценка доверительных интервалов определяемых параметров по нормальной выборке объёмом *n* с использованием двухсторонних квантилей вероятностного распределения Стьюдента с *n* степенями свободы (Смоленский, 2003). Поскольку имеющееся количество космических снимков явно недостаточно для достоверной статистической оценки точности, то количество экспериментальных определений спектральной чувствительности МСА искусственно увеличивалось за счёт разбиения входного множества большого количества наземных спектрометрических измерений ТО на независимые, взаимно не пересекающиеся подмножества. Для каждого из имеющихся снимков МСА "Сич-2" проводилось не менее пяти определений параметров спектральной чувствительности на независимых подмножествах ТО, и, таким образом, общее количество измерений составило $n \ge 25$. Средние 95%-вероятные погрешности определения параметров функций спектральной чувствительности МСА "Сич-2" по результатам съёмки тестовых объектов не превышают 5,91% для коэффициента масштабирования, 1,40% – для центральной длины волны и 9,08% – для стандартного отклонения гауссоиды. Результаты оценки спектральной чувствительности МСА спутниковой системы "Сич-2" по полученным параметрам гауссоид отображаются графиками, представленными на рис. 8.



Рис. 8. Расчётные функции спектральной чувствительности MCA спутниковой системы "Сич-2"

Полученные результаты оценки точности определения спектральной чувствительности МСА спутниковой системы "Сич-2" характеризуют лишь статистические погрешности метода, но не отражают методические и инструментальные погрешности, что может приводить к систематическим смещениям оцениваемых параметров. В частности, выявлено систематическое смещение центральных длин волн в длинноволновую часть спектра на 4,42% и систематическое увеличение ширины спектральных диапазонов на уровне 0,5 на 27,92%, что может объясняться как реально существующими отклонениями параметров MCA от номинальных, так и неучётом каких-то дополнительных влияющих факторов.

Для раскрытия данной неопределенности требуются реальные прямые физические измерения параметров спектральной чувствительности МСА, которые практически невозможно выполнить в условиях космического полёта.

Продолжаются аналогичные работы по полетным калибровкам МСА, входящих в состав КМСС на ИСЗ "Метеор-М" № 1. В работе (Жуков и др., 2012) продемонстрирована возможность проверки абсолютной калибровки КМСС по подспутниковым спектральным измерениям на ТО на полигонах ГКА Украины. Полетная калибровка функций спектральной чувствительности КМСС по рассмотренной в данной работе методике требует подготовки дополнительных достаточно больших (с линейным размером не менее нескольких сотен метров) квазиоднородных ТО вследствие более грубого пространственного разрешения МСА КМСС по сравнению с МСА "Сич-2". Подготовка и проведение такого подспутникового эксперимента планируется летом 2013 г. Калибровка МСА "Сич-2" и КМСС по одним и тем же ТО и аналогичным методикам позволит наиболее корректно сопоставлять и синтезировать полученную этими МСА информацию.

Выводы

Итак, в статье описан новый метод оценки спектральной чувствительности многоспектральной съёмочной аппаратуры по результатам космических съёмок тестовых объектов. Предложена специальная параметризация функций спектральной чувствительности MCA спутниковой системы "Сич-2", позволяющая решить систему уравнений переноса оптического излучения аналитически. Приведены результаты оценивания спектральной чувствительности MCA спутниковой системы "Сич-2" совместно по реальным снимкам и наземным спектрометрическим измерениям. Продемонстрирована возможность кросскалибровки MCA спутниковых систем "Сич-2" (Украина) и "Метеор-М" (Россия).

Анализ полученных результатов свидетельствует о важности тщательного подбора тестовых объектов для определения спектральной чувствительности МСА, что подтверждается также авторами работы (Biggar, Slater, Gellman, 1994). При отборе тестовых объектов следует руководствоваться не только стабильностью их спектральных характеристик, но и также их несхожестью. Так, использование покрытий с подобными распределе-

ниями спектрального отражения в качестве тестовых объектов обеспечивает худшие результаты, чем тестовые объекты с существенно отличающимися спектральными характеристиками.

В дальнейших исследованиях следует учитывать, что предложенная модель параметризации не является единственно возможной. Например, можно рассмотреть вариант описания функций спектральной чувствительности прямоугольником или трапецией. Для гауссовой параметризации уже разработана модель, в которой аппроксимация спектрального отражения ТО выполняется квадратичной функцией, что может быть полезно для некоторых типов покрытий. Современные численные методы позволяют решать системы интегральных уравнений вида (2) даже в том случае, когда интегралы нельзя выразить аналитически.

Последующие исследования планируется развивать по следующим направлениям: создание прототипа единой геоинформационной системы ККП, которая будет содержать геопространственные характеристики достаточного числа ТО, библиотеки их спектральных характеристик, сформированные по результатам прецизионного наземного спектрометрирования в различных сезонных и погодных условиях, в том числе и синхронно с запланированной спутниковой съёмкой. В такую систему предполагается интегрировать глубоко автоматизированные расчётные модули, позволяющие оперативно выполнять пространственную, спектральную и радиометрическую калибровку самых разных спутниковых систем ДЗЗ оптического диапазона.

Литература

- 1. 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" // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2009. Т. 6. № 1. С. 251-258.
- 2. Жуков Б.С., Полянский И.В., Куревлева Т.Г., Пермитина Л.И., Гектин Ю.М., Цветкова И.П., Попов М.А., Станкевич С.А., Дугин С.С. Полетная абсолютная радиометрическая калибровка комплекса многозональной спутниковой съемки на КА «Метеор-М» №1 // Десятая всероссийская открытая ежегодная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва, ИКИ РАН, 12-16 ноября 2012 г. Тезисы докладов. С. 587.
- 3. Кринов Е.Л. Спектральная отражательная способность природных образований / Ред. К.В. Чибисов // Академия наук СССР, Лаборатория аэрометодов. 1947. 271 с.
- 4. Крючков А.И. Устранение влияния атмосферы и учёт топографии подстилающей поверхности при многоспектральном дистанционном зондировании Земли из космоса // Исследование Земли из космоса, 2002. № 05. С.45-49.
- 5. Лялько В.І., Попов М.О. (ред.) Багатоспектральні методи дистанційного зондування Землі в задачах природокористування. Київ: Наукова думка, 2006. 360 с.
- 6. Попов М.О., Станкевич С.А., Зслик Я.І., Шкляр С.В., Семенів О.В. Калібрування спектральної чутливості сенсора багатоспектральної супутникової системи "Січ-2" за наземними спектрометричними вимірюваннями: попередні результати // Космічна наука і технологія. 2012. Т. 18. № 5. С. 59-65.
- 7. *Смоленский В.В.* Статистические методы обработки экспериментальных данных. СПб.: СПбГГИ(ТУ). 2003. 102 с.

- Станкевич С.А. Виявлення додаткових розпізнавальних ознак об'єктів за результатами багатозонального дистанційного спостереження в інфрачервоному спектральному діапазоні // Труди академії. 1999. Вип. 23. С. 92-99.
- 9. Станкевич С.А. Информативность оптических диапазонов дистанционного наблюдения Земли из космоса: практические алгоритмы // Космічна наука і технологія. 2008. Т. 14. № 2. С. 22-27.
- 10. Biggar S.F., Slater P.N., Gellman D.I. Uncertainties in the in-flight calibration of sensors with reference to measured ground sites in the 0.4-1.1 μm range // Remote sensing of environment. 1994. Vol. 48. No. 2. P. 245-252.
- 11. Clark R.N., Swayze G.A., Wise R., Livo K.E., Hoefen T.M., Kokaly R.F., Sutley S.J. USGS digital spectral library splib06a // USGS Digital Data Series 231, 2007. 1254 p.
- Justice C., Belward A., Morisette J., Lewis P., Privette J., Baret F. Developments in the validation of satellite sensor products for the study of the land surface // International Journal of Remote Sensing. 2000. Vol. 21. No. 17. P. 3383–3390.
- 13. Schowengerdt R.A. Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing. San Diego: Academic Press, 2007. 560 p.

Spectral response estimation of Sich-2 satellite system multispectral imager using ground-based spectrometry measurements

M.A. Popov¹, S.A. Stankevich¹, Y.I. Zelyk², S.V. Shklyar¹, O.V. Semeniv², S.S. Dugin¹, B.S. Zhukov³

¹ Scientific Centre for Aerospace Research of the Earth IGS NAS of Ukraine, Kiev, Ukraine E-mail: st@casre.kiev.ua
² Space Research Institute NAS and SSA of Ukraine, Kiev, Ukraine E-mail: adapt09@gmail.com
³ Space Research Institute RAS, Moscow, Russia E-mail: bzhukov@mail.ru

A technique for sensor spectral response estimation of Sich-2 multispectral satellite system based on satellite imaging of the Eupatoria (Ukraine) ground calibration test site is presented. A special parameterization of spectral response function of multispectral sensor is suggested. Such parameterization allows to solve analytically a system of equations of optical radiation transfer. The procedure for precision ground-based measurements of surface spectral reflectance of area-type test objects within Eupatoria ground calibration test site in June 2012 is described in detail. Results of sensor spectral response evaluation of Sich-2 multispectral satellite system using actual imagery and ground spectrometry measurements are discussed. Accuracy of spectral sensitivity determination for multispectral sensors of Sich-2 satellite system was evaluated statistically. Systematic shift in the central wavelength toward long-wave region and systematic increase in the width of spectral bands were registered with respect to the nominal values. A possibility of multispectral sensors cross-calibration for Sich-2 (Ukraine) and the Meteor-M (Russia) satellite systems at the same ground calibration test sites in Ukraine is demonstrated.

Keywords: remote sensing of the Earth, satellite system, multispectral survey apparatus, spectral sensitivity, calibration, ground-based test object.

References

- 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" (Ground calibration of KMSS cameras for Meteor-M satellite), Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa, 2009, Vol. 6, No. 1, pp. 251-258.
- Zhukov B.S., Polyanskii I.V., Kurevleva T.G., Permitina L.I., Gektin Yu.M., Tsvetkova I.P., Popov M.A., Stankevich S.A., Dugin S.S., Poletnaya absolyutnaya radiometricheskaya kalibrovka kompleksa mnogozonal'noi sputnikovoi s'emki na KA "Meteor-M" № 1 (In-light absolute radiometric calibration of the imaging multispectral sensor for Meteor-M No.1 satellite), *Desyataya vserossiiskaya konferentsiya "Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa"* (Proc. 10th all-Russia Open Conference "Current Prob-

lems in Remote Sensing of the Earth from Space"), Moscow, IKI RAS, 12-16 November 2012, Book of abstracts, p. 587.

- 3. Krinov E.L., *Spektral'naya otrazhatel'naya sposobnost' prirodnykh obrazovanii* (The spectral reflectance of natural formations), Academy of Sciences of the USSR. 1947, 271 p.
- 4. Kryuchkov A.I., Ustranenie vliyaniya atmosfery i uchet topografii podstilayushchei poverkhnosti pri mnogospektral'nom distantsionnom zondirovanii Zemli iz kosmosa (Excluding the influence of atmosphere and terrain elevations in the Earth multispectral remote sensing from space), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2002, No. 05, pp. 45-49.
- 5. Lyal'ko V.I., Popov M.O. (Eds.), *Bagatospektral'ni metodi distantsiinogo zonduvannya Zemli v zadachakh prirodokoristuvannya* (Multispectral remote sensing of the Earth in nature management), Kiiv: Naukova dum-ka, 2006, 360 p.
- Popov M.O., Štankevich S.A., Zelik Ya.I., Shklyar S.V., Semeniv O.V., Kalibruvannya spektral'noï chutlivosti sensora bagatospektral'noi suputnikovoi sistemi "Sich-2" za nazemnimi spektrometrichnimi vimiryuvannyami: poperedni rezul'tati (Sensor spectral response calibration of Sich-2 multispectral satellite system by ground spectrometry measurements: preliminary results), *Kosmichna nauka i tekhnologiya*, 2012, Vol. 18, No. 5, pp. 59-65.
- 7. Smolenskii V.V., *Statisticheskie metody obrabotki eksperimental'nykh dannykh* (Statistical methods for experimental data processing), Saint-Petersburg: SPbGGI(TU), 2003, 102 p.
- 8. Stankevich S.A., Viyavlennya dodatkovikh rozpiznaval'nikh oznak ob'ektiv za rezul'tatami bagatozonal'nogo distantsiinogo sposterezhennya v infrachervonomu spektral'nomu diapazoni (Target's additional features detection by multispectral remote sensing in infrared band), *Trudi akademiï*, 1999, Issue 23, p. 92-99.
- 9. Stankevich S.A., Informativnost' opticheskikh diapazonov distantsionnogo nablyudeniya Zemli iz kosmosa: prakticheskie algoritmy (Informativity of Earth remote sensing optical bands: practical algorithms), *Kosmichna nauka i tekhnologiya*, 2008, Vol. 14, No. 2, pp. 22-27.
- 10. Biggar S.F., Slater P.N., Gellman D.I., Uncertainties in the in-flight calibration of sensors with reference to measured ground sites in the 0.4-1.1 μm range, *Remote sensing of environment*, 1994, Vol. 48, No. 2, pp. 245-252.
- 11. Clark R.N., Swayze G.A., Wise R., Livo K.E., Hoefen T.M., Kokaly R.F., Sutley S.J., USGS digital spectral library splib06a, *USGS Digital Data Series 231*, 2007, 1254 p.
- 12. Justice C., Belward A., Morisette J., Lewis P., Privette J., Baret F., Developments in the validation of satellite sensor products for the study of the land surface, *International Journal of Remote Sensing*, 2000, Vol. 21, No. 17, pp. 3383-3390.
- 13. Schowengerdt R.A. *Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing*, San Diego: Academic Press, 2007, 560 p.