

Комп'ютерна графіка, візуалізація та обробка зображень

УДК 004.65, 004.67

Р.М. Басараб^{1,2}, аспірант, асистент¹Інститут космічних досліджень НАН України і ГКА України²Національний Університет біоресурсів і природопольовання України
Basarabru@gmail.com

Метод и результаты калибровки данных КС ДЗЗ «Сич-2»

В данной работе предложена регрессионная модель радиометрической коррекции данных КА «Сич-2». Модель построена на основе кросскалибровки данных ДЗЗ КА «Сич-2» и продукта атмосферной коррекции Landsat7. Обучающая выборка для создания модели сформирована с помощью алгоритма MAD. Проведен анализ адекватности модели. Представлены результаты калибровки данных «Сич-2». Рассмотрен ряд проблем, которые возникают при использовании предложенной модели.

Ключевые слова: данные дистанционного зондирования Земли, радиометрическая коррекция, атмосферная коррекция, спутник, регрессионная модель, коэффициент спектральной яркости.

Введение

Значения коэффициентов отражения солнечного излучения поверхностью Земли и значения спектральной яркости, полученные с помощью космических систем, являются очень важным источником информации для решения тематических задач обработки спутниковых данных [1-6]. Особую ценность представляет информация, полученная от космических аппаратов высокого пространственного разрешения с абсолютной радиометрической погрешностью, меньшей, чем несколько процентов. Поэтому обеспечение калибровки сенсоров и данных является актуальной задачей для всех космических аппаратов, в частности, украинского аппарата «Сич-2».

Для каждого космического аппарата в лабораторных условиях разрабатываются соответствующие модели (преобразования) для радиометрической коррекции полученных данных. Однако после запуска космического аппарата эти преобразования требуют уточнения в результате деградации сенсоров. Деградация сенсоров происходит по нескольким причинам: изменение отклика инструмента с момента его вывода на орбиту, старения бортовой аппаратуры [7], и т.д. Следовательно, в зависимости от особенностей сенсора, он должен постоянно рекалиброваться в условиях полета. В некоторых случаях эту проце-

ду необходимо проводить несколько раз в секунду, в других раз в неделю, месяц, или реже [7].

С целью уточнения параметров преобразования для радиометрической коррекции спутниковых изображений используют информацию, полученную сенсором с наземных калибровочных полигонов. Спектральные характеристики объектов, размещенных на таких полигонах, являются заранее известными.

Другой подход к радиометрической коррекции данных состоит в кросс калибровке данных одного спутника на основе откалиброванных данных второго. Один из подобных подходов описан в [8]. Основываясь на перекрестном сравнении данных космического аппарата India's ResourceSat satellite (IRS-P6) Advanced Wide Field Sensor (AWiFS) и данных спутников Landsat5 TM, Landsat7 ETM+ и MODIS, в [8] построены соответствующие модели линейной регрессии. Исследования представленные в [8] показывают, что данные, полученные датчиком AWiFS, космического аппарата IRS-P6, могут быть кросс калиброваны к датчику Landsat5 TM с точностью до 13%, L7 ETM+ в пределах 15%, а MODIS в пределах 21% без учета спектрального несоответствия атмосферы.

В данной работе предлагается метод кросс калибровки данных «Сич-2» по радиометрически скорректированным данным спутника Landsat5.

1 Существующие подходы к калибровке и радиометрической коррекции спутниковых данных

Поскольку изображения, полученные со спутников, представляются в виде так называемых "сырых значений" спектральной яркости (Digital Number), задача радиометрической калибровки заключается в приведении этих значений к физическим единицам: спектральной яркости, или указателем отражательной способности поверхности Земли. В работе [9] представлены модели для калибровки данных, полученных с помощью сенсоров Multispectral Scanner (MSS), Thematic Mapper (TM), Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+), и Advanced Land Imager (ALI). Представленные модели калибровки учитывают структуру сенсоров и специфику их работы до запуска непосредственно космических аппаратов на орбиту. Такие преобразования цифровых значений изображений создают базу для стандартизации спутниковых данных, которая служит основой для сравнения спутниковой информации, полученной от различных сенсоров, о некоторой отснятой сцене за различные периоды времени.

Для обработки информации спутниковых датчиков цветов океана SeaWiFS и MODIS, разработана система орбитальной калибровки данных [10]. Данная система калибровки включает в себя набор коэффициентов усиления, которые применяются к наблюдаемой солнечной радиации, которая фиксировалась в верхних слоях атмосферы. В сочетании с процессом атмосферной коррекции это дает возможность воспроизвести ожидаемые указатели отражения солнечной радиации воды и структуру поверхности океана. Такой подход к орбитальной калибровке данных является независимым от интенсивности источника излучения и значительно повышает качество информации о структуре поверхности воды. Но эта методика неразрывно связана с алгоритмом атмосферной коррекции и предназначена исключительно для приборов рассмотренных сенсоров.

Для калибровки информации, представленной мультиспектральными сенсорами, или сенсорами, которые детектируют видимое и ближнее инфракрасное излучение, эффективным является подход отбора изображений космических аппаратов, снятых одновременно в надир, над одним и тем же участком поверхности Земли. В этом заключается так называемый SNO (simultaneous nadir overpass) метод, описанный в работе [11] и применен для кросс калибровки данных спутников NOAA-16/AVHRR, NOAA-17/AVHRR и AQUA / MODIS. Согласно рассматриваемому методу, разница в калибровке соответствующих спектральных каналов, полученных с помощью пары сенсоров, определяется из полученных изображений, отснятых почти в одно и то же вре-

мя с аналогичным целевым видом Земли. Однако важно отметить, что при таком подходе необходимо проводить коррекцию спутниковых данных, которая будет зависеть от особенностей сенсора и типа подстилающей поверхности Земли. Для робастности полученных моделей калибровки, исследования необходимо проводить для определенного набора пар изображений, полученных с помощью соответствующих датчиков, поскольку на изображениях могут присутствовать различные типы поверхностей, соответственно с различными спектральными характеристиками. Применение данной методики для калибровки данных «Сич-2» было бы целесообразным, но существует ряд проблем. Во-первых, относительно малое количество изображений «Сич-2» снято в надир; во-вторых, возникает проблема в отыскании эталонных изображений космических аппаратов с подобным сканирующим сенсором, и их изображений, которые были бы одновременно с изображениями «Сич-2» отсняты в надир.

Для данных Landsat5 TM и Landsat7 ETM+ разработан метод спектральной и атмосферной коррекции для оценки поверхности альбедо [12] (характеристика отражательной (рассеивающей) способности поверхности) с использованием метода атмосферной корректировки (атмосферного кода) 6S [13]. Последний является физически обоснованной моделью, но не является оптимизированным для специфических спутниковых сцен, тестовых объектов или конкретных ландшафтов и разработан для внесения атмосферной поправки к данным коротковолнового диапазона.

Другой возможный подход к кросскалибровке наборов данных от двух (или более) спутников заключается в усреднении (нормализации) информации, полученной в течение длительного периода времени, или глобальных территориальных регионов. Чаще всего такая методика применяется к данным, которые уже есть территориально усредненными, например, для анализа климатических тенденций. При таком подходе (как и для всех других методов кросс калибровки) необходимо учитывать особенности каждого из рассматриваемых инструментов. В частности, все изменения в подстилающей поверхности Земли, изменения углов проведения съемки, а также изменение угла падения солнечного излучения в результате могут нести значительное влияние на результирующие откалиброванные данные [14-16].

Часто возникает потребность в сопоставлении и сравнении данных спутников, которые физически не могут производить съемку некоторого участка поверхности земли в одно и то же время. Например орбиты, по которым движутся спутники не имеют соединений, или же данные спутники вообще не работали в течение одного и того же периода времени. В некоторых случаях исполь-

зуют так называемые «двойственно разностные методы» [17], в которых данные каждого из рассматриваемых спутников сравниваются с данными третьего спутника, которые в свою очередь используются в качестве трансфера для преодоления разрыва.

Известен еще один возможный метод калибровки спутниковых данных, который не связан с бортовой системой космического аппарата. Так называемый подход косвенной калибровки, осуществляющий оценку спектрального сияния, полученного датчиком спутника над конкретным наземным тестовым полигоном, с учетом наземных спектральных измерений [18,19]. Данная методика имеет относительно высокую точность (конечно ниже, чем при лабораторных исследованиях), но требует информации, полученной с помощью полевых наземных исследований, которые требуют значительных материальных затрат и чрезвычайно трудоёмки.

17 августа 2011 Украина запустила собственный КА ДЗЗ «Сич-2». Поскольку для спутника Сич-2 не предусмотрен механизм калибровки сенсоров во время полета, возникает потребность в создании методов и алгоритмов калибровки спутниковых данных, которые позволили бы соответствующим образом строить исходную геопространственную информацию, предоставленную КС «Сич-2», к реальным значениям отраженной солнечной радиации

2 Постановка задачи и предложенный метод калибровки данных «Сич-2»

КА ДЗЗ «Сич-2» создан для наблюдения за поверхностью Земли в оптическом и среднем инфракрасном диапазонах. Его цифровые оптико-электронные снимки поверхности Земли включают информацию с панхроматического спектрального канала (длина волны в диапазоне 0.51-0.90 μm). А так же каналов с красной и зеленой областей спектра оптического диапазона (длина волны зеленого канала - 0.51-0.59 μm , красного - 0.61-0.68 μm) и канала ближнего инфракрасного диапазона (0.80 - 0.89 μm).

Поскольку для данных КА ДЗЗ «Сич-2» не предусмотрено процедуры калибровки сенсоров во время полета, а прямое применение известных методов калибровки данных, разработанных для других сенсоров, невозможно в связи с отсутствием модели атмосферной коррекции, целесообразной является задача разработки метода калибровки данных на основе откалиброванных данных других сенсоров.

Именно этот подход и предлагается применить для калибровки данных КА ДЗЗ «Сич-2» в нашей статье. В качестве эталонных данных будем использовать откалиброванные данные спутника Landsat7 ETM, поскольку задекларирован-

ные характеристики сенсора этого аппарата являются наиболее близкими к характеристикам украинского аппарата «Сич-2».

Основная гипотеза, положенная в основу предложенного метода, заключается в следующем. Если мы имеем снимки с двух космических сенсоров с близкими характеристиками для одной территории, полученные один и тот же момент времени (или же с минимальным допустимым интервалом времени), то можно построить регрессионную модель зависимости калиброванных значений одного аппарата от коэффициентов отражения земной поверхности, полученных с откалиброванного сенсора другого аппарата.

Целью исследования является создание информационной технологии калибровки данных КА ДЗЗ «Сич-2» на основе данных Landsat7 ETM. Для достижения этой цели, прежде всего, необходимо разработать регрессионные модели зависимости значений каждого из каналов КА ДЗЗ «Сич-2» от данных соответствующих каналов Landsat7 ETM и проанализировать адекватность таких моделей. Для кросскалибровки данных предлагается использовать следующий алгоритм (рис. 1), включающий процесс получения, предварительной обработки и непосредственной калибровки данных «Сич-2».

Получив необходимые эталонные данные Landsat7 ETM в виде набора цифровых значений (digital numbers) спектральной яркости с помощью сенсора ETM, проводим процесс атмосферной коррекции. В результате чего получаем данные Landsat 5 ETM, представленные в виде цифровых значений коэффициентов отражения солнечной радиации поверхностью Земли (surface reflectance), которые будут служить нам эталоном для кросскалибровки данных «Сич-2». Соответственно, как один из продуктов атмосферной коррекции данных Landsat7 ETM, будет использоваться маска облачности, которая включает в себя набор из трех видов данных. Это набор пикселей, которые соответствуют самим облакам, их теням, а так же включают буферную зону вокруг облаков.

Данные «Сич-2» представлены в виде набора цифровых значений спектральной яркости, полученных с помощью многозонального сканирующего устройства, установленного на данном КА. В качестве входных данных использовались только значения пикселей в зеленом, красном и ближнем инфракрасном спектральных диапазонах.

После предварительной обработки входных данных осуществляется сопоставление пикселей соответствующих спектров изображений с целью поиска псевдоинвариантных целей, т. е. объектов (пикселей, или же наборов пикселей), которые меньше всего отличаются по спектральным характеристикам входных изображений. Это реали-

зовано с помощью алгоритма MAD (multivariate alteration detection), который уже использовался ранее для калибровки данных Landsat в работе [20]. Именно для улучшения работы этого алгоритма и создается маска облачности данных «Сич-2», которая вычитается из изображения перед началом поиска псевдоинвариантных целей.

После получения набора пикселей для данных Landsat7 ETM и «Сич-2», соответствующих множеству псевдоинвариантных целей, осуществляется сопоставление пикселей между снимками, с целью определения зависимости и построения модели линейной робастной регрессии. Далее происходит оценка адекватности данных моделей, и непосредственно процесс калибровки. После получения откалиброванных данных «Сич-2»,

рассчитываются среднеквадратические отклонения между эталонными данными Landsat7 ETM, и исходящими «Сич-2».

3 Результаты численного эксперимента

В качестве исходных данных был взят набор архивных снимков «Сич-2» (19 шт.), а также соответствующих им территориально снимков Landsat 7, отснятых с разницей не более чем в трехдневный период, от даты съемки данных «Сич-2». В случае, когда для одного снимка «Сич-2» существует 2 или 3 базовых снимка Landsat7, из последних строится мозаика посредством «склеивания» (с использованием библиотеки абстракции геопространственных данных GDAL).

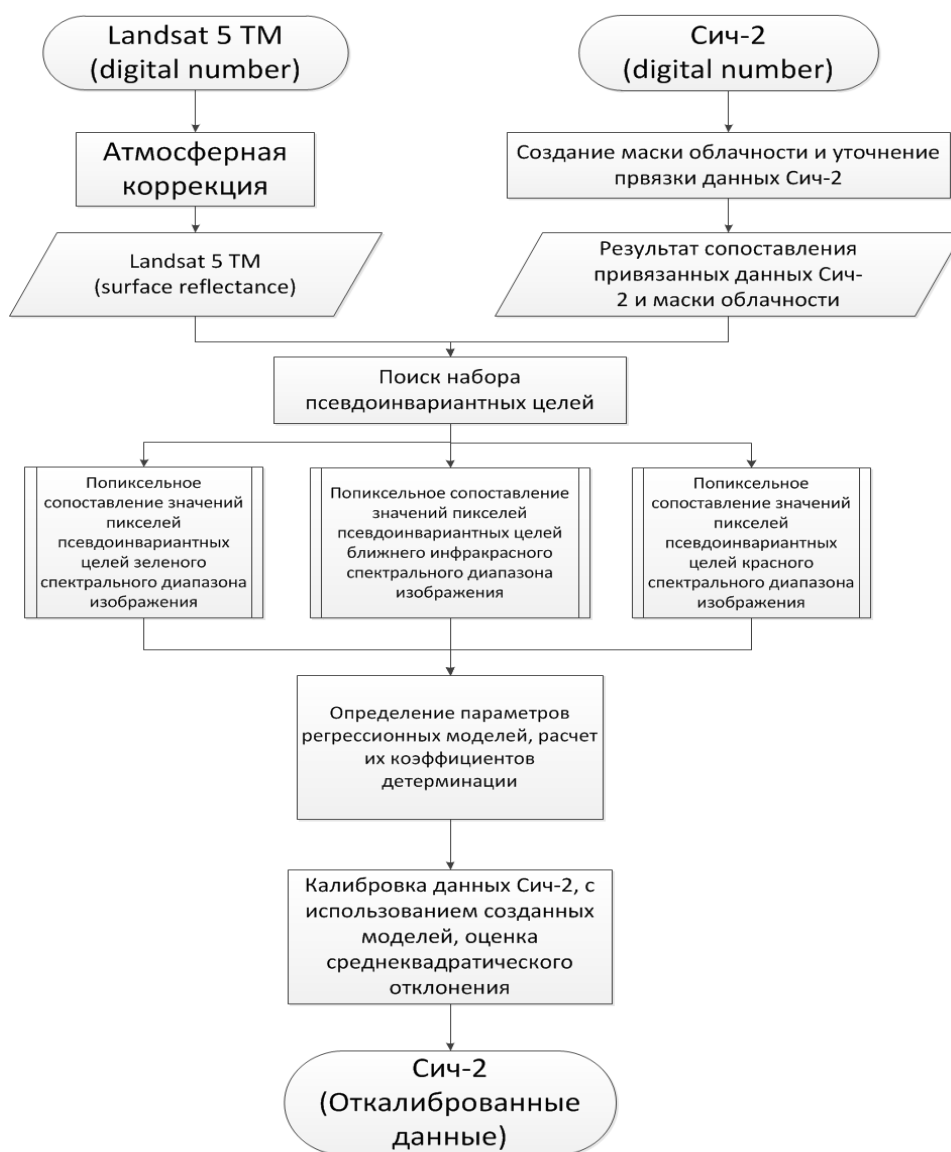


Рисунок 1 - Схема процесса получения и обработки данных «Сич-2» и эталонных данных Landsat 7

Для задачи калибровки значений каналов спутникового изображения очень важным является соблюдение наименьшего возможного промежутка времени, который проходит между съемкой эталонного и обрабатываемого изображения. Поскольку в течение длительного периода времени происходит изменение структуры и покрытия отснятой поверхности. Например, сбор урожая с земельного участка, или земельный участок может быть вспахан. Это соответствующим образом влияет на значение цифровой информации спутниковых изображений рассматриваемой территории и увеличивает погрешность калибровки данных.

Для эталонного изображения проведена атмосферная коррекция, с помощью алгоритма, разработанного NASA и представленного в работе [21]. Таким образом, удалось минимизировать влияние атмосферы на цифровую информацию снимка Landsat7 ETM+. Для данных «Сич-2» была произведена смена разрешения (изменение размеров пикселя) с 7.5м. до 30м. методом усреднения группы пикселей высшей разрешенности в пределах пикселя низкой разрешенности. Таким образом, размеры пикселей стали одинаковыми для исходного изображения и эталона. Цифровая информация продукта атмосферной коррекции Landsat7 ETM+ изменяется в диапазоне от 0 до 10000. Цифровая же информация входного спутникового изображения «Сич-2» изменяется от 0 до 255, аналогично данные Landsat7 ETM+ (уровня обработки L1B) тоже являются 8-битными. Именно поэтому данные Landsat были взяты как эталонные для кросскалибровки.

После попиксельного сопоставления цифровой информации изображений, на основе корреляции цифровых данных пикселей исходных изображений были созданы соответствующие линейные модели робастной регрессии

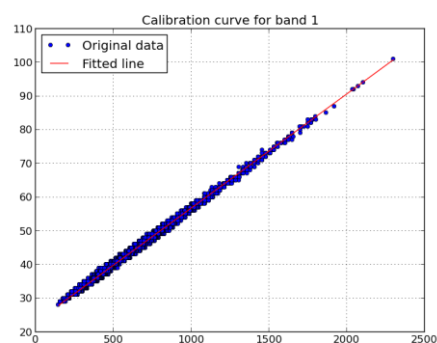
$$\hat{y}_i = \alpha + \beta_i x_i, \quad (1)$$

$$i = 1, \dots, n$$

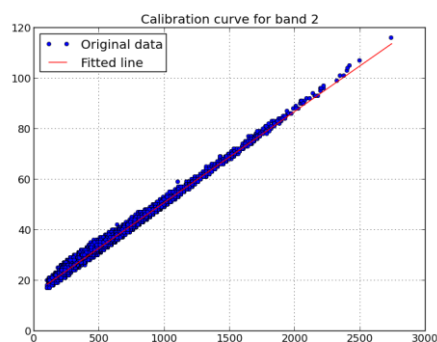
где i - количество наблюдений (в нашем случае количество пикселей набора псевдоинвариантных целей, отысканных с помощью алгоритма MAD). Соответственно, количество наблюдений для каждого снимка «Сич-2» было разным.

В качестве примера, на рис. 2 графически представлена зависимость между значениями пикселей псевдоинвариантных целей снимка «Сич-2» и мозаики снимков Landsat7.

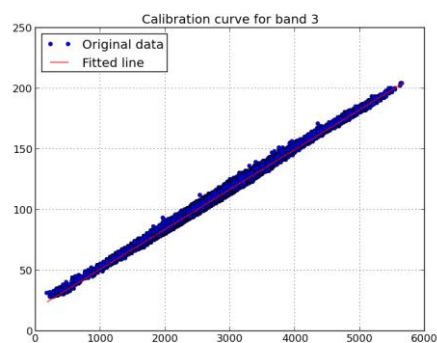
На рис. 2 красным обозначенные линии робастной регрессии.



(а)



(б)



(в)

Рисунок 2 – Графики зависимости цифровой информации псевдоинвариантных целей мозаики снимков Landsat7 (ось абсцисс) и снимка «Сич-2» (ось ординат) в зеленом (а), красном (б) и ближнем инфракрасном (в) спектральных диапазонах.

В данном случае формулы регрессии имели следующий вид:

Для зеленого спектрального диапазона

$$f_{GREEN}(x) = 29,2443 \cdot f_i^{SG}(x) - 667,709 \quad (2)$$

где $f_i^{SG}(x)$ - цифровые значения пикселей псевдоинвариантных целей канала «зеленого» спектрального диапазона снимка «Сич-2». Коэффициент детерминации модели равен 0,99. Среднеквадратическая ошибка модели, равна 11,7889 условных единиц КСЯ (коэффициента

спектральной яркости подстилающей поверхности Земли, который изменяется в относительных единицах, в диапазоне от 0 до 1, или же в нашем случае от 0 до 10000) или около 0,0012%.

Для красного спектрального диапазона

$$f_{RED}(x) = 27.383 \cdot f_i^{SR}(x) - 403,632 \quad (3)$$

где $f_i^{SR}(x)$ - цифровые значения пикселей псевдоинвариантных целей канала «красного» спектрального диапазона снимка «Сич-2». Коэффициент детерминации модели равен 0,98. Среднеквадратическая ошибка модели равна 19,2232 у.е. КСЯ или около 0,0019%.

Для ближнего инфракрасного спектрального диапазона

$$f_{NIR}(x) = 30.1777 \cdot f_i^{SNIR}(x) - 533,051 \quad (4)$$

где $f_i^{SNIR}(x)$ - цифровые значения пикселей псевдоинвариантных целей канала «ближнего инфракрасного» спектрального диапазона снимка «Сич-2». Коэффициент детерминации модели равен 0,99. Среднеквадратическая ошибка модели составляет 44,6613 у.е. КСЯ, или около 0,0045%.

Среднеквадратическая ошибка вычислялась по формуле

$$RMSError = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{n}}, \quad (5)$$

где n - количество пикселей псевдоинвариантных целей, \hat{y}_i - данные «Сич-2», полученные с использованием модели калибровки, y_i - эталонные данные мозаики снимков Landsat7.

Для вычисления R^2 статистики и среднеквадратической ошибки модели отбиралось только 95% всех данных, т.е. отбрасывались 5% тех пар данных \hat{y}_i и y_i , для которых наибольшим было среднеквадратическое отклонение между ними.

Результатом применения созданных моделей калибровки к исходным данным «Сич-2» является откалиброванный снимок «Сич-2», цифровые значения пикселей в заявленных каналах которого изменяются в диапазоне от 0 до 10000.

На рисунке 3 представлены композиты (NIR, RED, GREEN) исходного снимка «Сич-2», результата его калибровки и соответствующей мозаики эталонных данных.

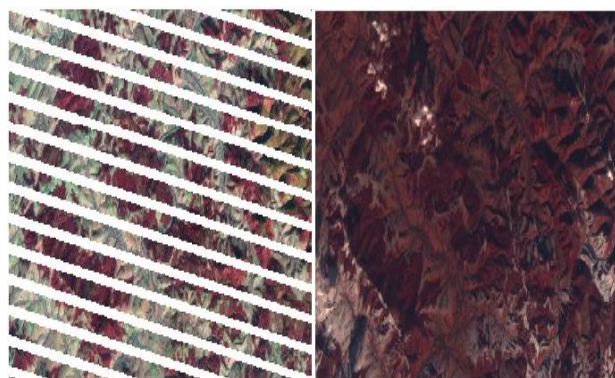


Рисунок 3 – Графическое представление данных (эталонных, откалиброванных и исходных, в порядке сверху вниз).

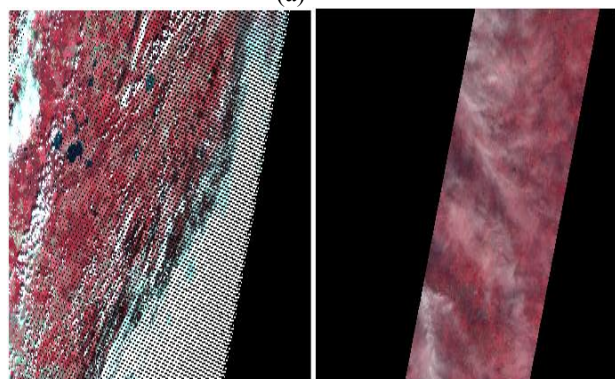
Суммируя результаты обработки всех снимков «Сич-2», можно отметить следующее. Для калибровки 17-ти из них отлично подошла линейная модель робастной регрессии. Средние значения коэффициентов детерминации для зеленого, красного и ближнего инфракрасного спектральных диапазонов составляли соответственно 0,8789, 0,9484 и 0,9816. Усредненные среднеквадратические ошибки моделей составляли 40,5247, 44,0085 и 60,5428 у.е. КСЯ (или же 0,004%, 0,0044% и 0,006%) соответственно для зеленого, красного и ближнего инфракрасного спектральных диапазонов.

Для калибровки трех снимков модель линейной робастной регрессии оказалась непригодной. Причиной является «плохой» набор данных псевдоинвариантных целей. В первом случае (см. рис. 4 а) на снимке была отснята территория гор и горная местность. Стоит принять во внимание тот факт, что базовый и эталонный снимки сделаны в разные дни и разное время суток (возникает несовпадение теней). А так же тот факт, что часть данных находится в тенях от гор, в то время на пиках гор присутствует снег (слишком большая разница в отражении солнечной радиации снега и затемненных участков). Соответственно набор псевдоинвариантных целей не является репрезентативным. Во втором (см. рис.

4 б) случае значительная часть отснятых территорий находится под влиянием атмосферных явлений (тучи, дымка и т.п.).



(a)

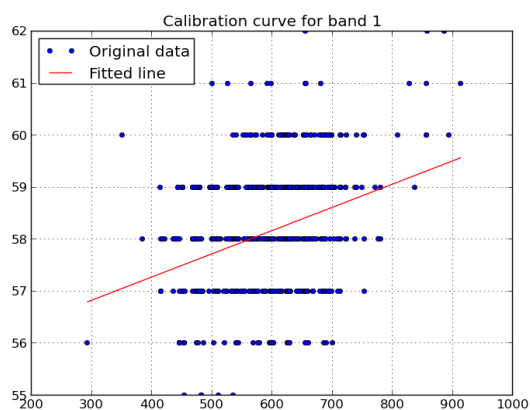


(б)

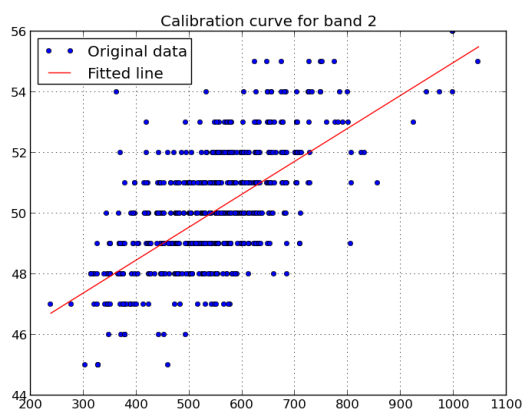
Рисунок 4 – Графическое представление базовых данных «Сич-2» (справа) и эталонных Landsat7 (слева), для калибровки которых не подходят модели, предложенные в этой статье.

Атмосферные явления вносят нелинейную ошибку при сопоставлении цифровой информации снимков и влияют на процесс поиска псевдоинвариантных целей. На рис. 5 графически представлена зависимость между значениями пикселей псевдоинвариантных целей в зеленом (а), красном (б) и ближнем инфракрасном (в) спектральных диапазонах снимка «Сич-2» и соответствующей мозаики снимков Landsat7.

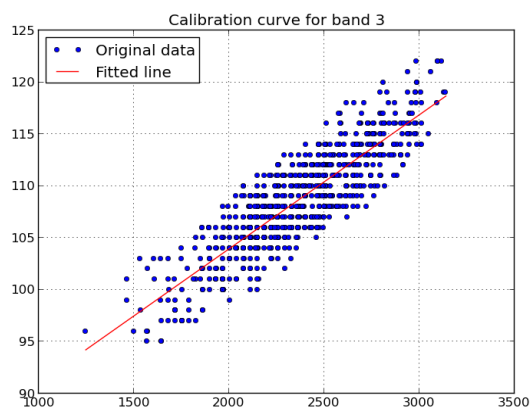
Параметры моделей, разработанных для каждого из рассмотренных каналов спектральных диапазонов 17 обработанных снимков, отличаются между собой (рис. 6). Это свидетельствует о том, что не существует единой модели, которая бы подходила для калибровки всех снимков «Сич-2»



(a)

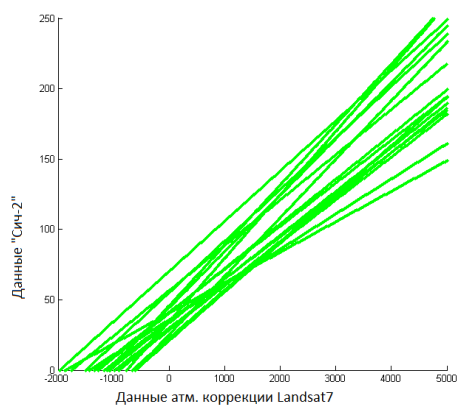


(б)

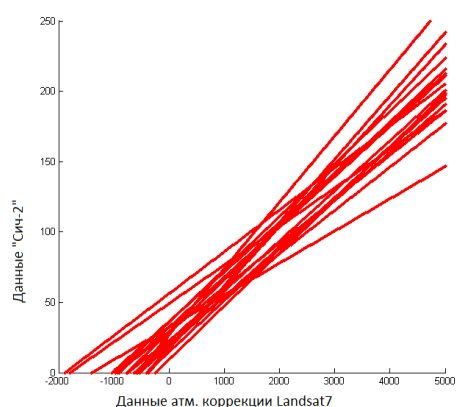


(в)

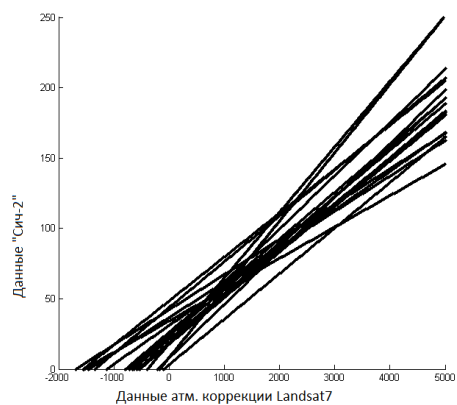
Рисунок 5 – Графическое представление сопоставления цифровой информации базового снимка «Сич-2» (ось ординат), и эталонного Landsat7 (ось абсцисс) для данных зеленого (а), красного (б) и ближнего инфракрасного (в) спектральных диапазонов. Красным обозначена линия робастной регрессии.



(а)



(б)



(в)

Рисунок 6 – Графики линий робастной регрессии зависимости данных «Сич-2» (ось ординат) и Landsat7 (ось абсцисс) для зеленого (а), красного (б) и ближнего инфракрасного спектральных диапазонов.

Заключение

В данной работе представлена модель радиометрической калибровки спутниковых данных КА ДЗЗ «Сич-2», основанная на кросс калибровке данных космической системы ДЗЗ «Сич-2» и данных Landsat7 ETM+. Модель апробирована на 19-ти архивных снимках «Сич-2» для территории Украины за период 2011-2012гг. Максимальный временной период между съемкой базовых и эталонных данных составлял 3 дня.

Экспериментально показано, что существует линейная зависимость между цифровой информацией спутниковых данных КА «Сич-2» и продуктом атмосферной коррекции Landsat7 ETM+. На основе этой зависимости созданы линейные регрессионные модели для калибровки данных «Сич-2». Адекватность созданных моделей, выраженная коэффициентом детерминации, составляет в среднем 0,88, 0,95 и 0,98, для «зеленого», «красного» и «ближнего инфракрасного» спектральных диапазонов электромагнитного излучения соответственно для 17 снимков. Созданные модели позволяют переводить цифровую информацию изображений «Сич-2» в относительные значения коэффициента спектральной яркости подстилающей поверхности Земли. Для повышения точности калибровки был использован алгоритм MAD, с помощью которого сопоставлялись не все пиксели изображений, а только пиксели объектов, которые подвергались наименьшим изменениям на отрезке времени между съемкой базовых и эталонных данных. Для снимков «Сич-2» была выполнена предварительная географическая привязка [22], что значительно улучшило результат калибровки.

В рамках проведенных работ показано, что не существует модели со стандартным набором параметров для калибровки произвольных данных КА «Сич-2». В будущем планируется провести комплекс работ, связанных с исследованием возможности использования единого глобального покрытия эталонных данных Landsat7 для реализации моделей кросскалибровки данных «Сич-2». В случае успеха это позволит создать единую систему калибровки данных «Сич-2».

Так же был рассмотрен ряд проблем, которые препятствуют использованию предложенной модели. В будущем будут проводиться исследования по возможному их устранению.

Список литературы

1. Kussul N. Interoperable Infrastructure for Flood Monitoring: SensorWeb, Grid and Cloud / N. Kussul, D. Mandl, K. Moe, J.P. Mund, J. Post, A. Shelestov, S. Skakun, J. Szarzynski, G.Van Langenhove, M. Handy // IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. – 2012. Vol. 5. No. 6. P. 1740-1745.

2. Kussul N. The Wide Area Grid Testbed for Flood Monitoring Using Earth Observation Data / N. Kussul, A. Shelestov, S. Skakun, G. Li, O. Kussul // IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. – 2012. Vol. 5. No. 6. P. 1746-1751.
3. Kussul N. Crop area estimation in Ukraine using satellite data within the MARS project 2012 / . N. Kussul, S. Skakun, A. Shelestov, O. Kravchenko, J.F. Gallego, O. Kussul // IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. 22-27 July, 2012. (IGARSS). P. 3756-3759.
4. Gallego J.F. Efficiency Assessment of Different Approaches to Crop Classification Based on Satellite and Ground Observations / J.F. Gallego, O. Kravchenko, N. Kussul, S. Skakun, A. Shelestov, Y. Gripich // Journal of Automation and Information Sciences. – 2012. Vol. 44. No. 5. P. 67–80.
5. Shelestov A.Yu. Geospatial information system for agricultural monitoring / A.Yu Shelestov, A.N. Kravchenko, S.V. Skakun, S.V. Voloshin, N.N Kussul // Cybernetics and Systems Analysis. – 2013. Vol. 49. Issue 1. P. 124-132.
6. Kogan F. Winter wheat yield forecasting in Ukraine based on Earth observation, meteorological data and biophysical models / F. Kogan, N. Kussul, T. Adamenko, S. Skakun, O. Kravchenko, O. Kryvobok, A. Shelestov, A. Kolotii, O. Kussul & A. Lavrenyuk // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. – 2013. Vol. 23. P. 192-203.
7. Gyanesh C. Overview of Intercalibration of Satellite Instruments / C. Gyanesh, Tim J. Hewison, Nigel Fox, Xiangqian Wu, Xiaoxiong Xiong, and William J. Blackwell // IEEE transactions on geoscience and remote sensing, March 2013. Vol. 51. No. 3.
8. Chander G. Cross-comparison of the IRS-P6 AWiFS sensor with the L5 TM, L7 ETM+, & Terra MODIS sensors / G. Chander, X. Xiong, A. Angal, T. Choi, R. Malla // Proc. SPIE, Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites XIII, 74740Z. September 22, 2009.
9. Chander G. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors / G. Chander, B. L. Markham, and D. L. Helder // Remote Sens. Environ, May 2009. Vol. 113. No. 5. P. 893–903.
10. Bryan A. Franz. Sensor-independent approach to the vicarious calibration of satellite ocean color radiometry / Franz A. Bryan, Sean W. Bailey, Jeremy P. Werdell, and Charles R. McClain // Applied Optics. 09 July 2007. Vol. 46. Issue 22. P. 5068-5082.
11. Cao C. Intersatellite calibration of Polar-orbiting radiometers using the SNO/SCO method / C. Cao, F. Weng, M. Goldberg, X. Wu, H. Xu, and P. Ciren // IEEE International Geoscience Remote Sensing Symposium. – 2005. Vol. 1. P. 109–112.
12. Zoran M. Atmospheric and spectral corrections for estimating surface albedo from satellite data / M. Zoran, S.Stefan // Journal of optoelectronics and advanced materials, February, 2006. Vol. 8. No. 1. P. 247 – 251.
13. Vermonte E. F. Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum, 6S: An Overview / E. F. Vermonte, D. Tanre, J. L. Deuze, M. Herman, J. J. Morcrette // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, May, 1997. Vol. 35. No. 3. P. 675-686
14. Shi L. Three decades of intersatellite-calibrated High-Resolution Infrared Radiation Sounder upper tropospheric water vapor / L. Shi and J. J. Bates // Journal of Geophysical Research, Feb., 2011. Vol. 116. Issue D4. DOI: 10.1029/2010JD014847
15. Mears C. A. Construction of the RSS V3.2 lower tropospheric temperature dataset from the MSU and AMSU microwave sounders / C. A. Mears and F. J Wentz // Oceanic Technol, Aug., 2009. Vol. 26. No. 8. P. 1493–1509.
16. Semunegus H. An extended and improved Special Sensor Microwave Imager (ssm/i) period of record / H. Semunegus, W. Berg, J. J. Bates, K. R. Knapp, and C. Kummerow // J. Appl. Meteorol. Climatol., March, 2010. Vol. 49. No. 3. P. 424– 436.
17. Wang L., Goldberg M., Wu X., Cao C., Iacovazzi R.A., Yu Jr., F., and Li Y. Consistency assessment of atmospheric infrared sounder and infrared atmospheric sounding interferometer radiances: Double differences versus simultaneous nadir overpasses // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 16 Jun. 2011. Vol. 116. Issue D11. DOI: 10.1029/2010JD014988.
18. Thome K. Sampling and uncertainty issues in trending reflectancebased vicarious calibration results / K. Thome // Proc. SPIE Earth Observing Systems X. 09 September 2005. Vol. 5882. P. 397-407.
19. Thome K. Ground-reference techniques for the absolute radiometric calibration of MODIS / K . Thome, E. Whittington, N. Smith, P. Nandy, and E. Zalewski // in Proc. SPIE Earth Observing Syst. V. 15 Nov. 2000. Vol. 51. doi:101117/12.494219.

20. Todd A. Schroeder. Radiometric correction of multi-temporal Landsat data for characterization of early successional forest patterns in western Oregon / Todd A. Schroeder, Warren B. Cohen, Conghe Song, Morton J. Canty, Zhiqiang Yang. // Remote Sensing of Environment, March, 2006. Vol. 103. P. 16–26.
21. Jeffrey G. Masek. A Landsat Surface Reflectance Dataset for North America, 1990-2000 / Jeffrey G. Masek, Eric F. Vermote, Nazmi E. Saleous, Robert Wolfe, Forrest G. Hall, Karl F. Huemmrich, Feng Gao, Jonathan Kutler, and Teng-Kui Lim. // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. Jan. 2006. Vol. 3. No. 1. P. 68-72.
22. Huber P.J. Robust Statistics, Second Edition / Peter J. Huber, Elvezio M. Ronchetti // John Wiley and Sons inc. NY. - 2009. ISBN 9780470129906.
23. Федоров О.П. Інформаційна технологія географічної прив'язки даних космічної системи ДЗЗ «Січ-2» для території України / О.П. Федоров, Н.М. Куссуль, О.М. Кравченко, С.Л. Янчевський, Р.М. Басараб, В.М. Кригін, М.С Лавренюк // Космічна наука і технологія. К. - 2013р. Том 13. №1. С. 3-12.

Надійшла до редакції 12.10.2013

Р.М.Басараб

Інститут космічних досліджень НАНУ - НКАУ

Національний університет біоресурсів і природокористування України

МЕТОД ТА РЕЗУЛЬТАТИ КАЛІБРУВАННЯ ДАНИХ КС ДЗЗ «СІЧ-2»

У роботі запропоновано регресійну модель радіометричної корекції даних КА «Січ-2». Модель побудована на основі кроскалібрування даних ДЗЗ КА «Січ-2» і продукта атмосферної корекції Landsat7. Навчальна вибірка для створення моделі сформована за алгоритмомMAD. Проведений аналіз адекватності моделі. Представлені результати калібрування даних «Січ-2». Розглянуто низку проблем, що виникають при використанні запропонованої моделі.

Ключові слова: дані дистанційного зондуванняЗемлі, радіометрична корекція, атмосферна корекція, супутник, регресійна модель, коефіцієнт спектральної яскравості.

R.M.BASARAB

Space Research Institute NASU-NSAU

National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine

THE METHOD AND RESULTS OF REMOTE SENSING DATA CALIBRATION OF REMOTE SENSING SPACE SYSTEM "SICH-2"

In this paper the regression model for radiometric correction satellite "Sich-2" data is proposed. The model is based on cross-comparing remote sensing data of satellite "Sich-2" and product of atmosphere correction Landsat7 data. The training set for model creation formed with the help of MAD algorithm. The analysis of the adequacy of the model is conducted. Results of the calibration of remote sensing data "Sich-2" are presented. Some problems that arise when using the proposed model are reviewed.

Keywords: remote sensing data, calibration, space craft, regression model, atmosphere correction.