



УДК 528.8.04

МЕТОД КОРРЕКЦИИ РАДИОМЕТРИЧЕСКИХ ИСКАЖЕНИЙ МНОГОЗОНАЛЬНЫХ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

А.Н. Григорьев^а^а Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург, 197198, Российская Федерация

Адрес для переписки: Grig-AN@ya.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 20.04.15, принята к печати 05.06.15

doi:10.17586/2226-1494-2015-15-4-595-602

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Григорьев А.Н. Метод коррекции радиометрических искажений многозональных данных дистанционного зондирования Земли // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2015. Т. 15. № 4. С. 595–602.**Аннотация**

Предмет исследования. Исследуются технологии наземной вторичной обработки разнородных многозональных данных. К факторам разнородности данных отнесена неравномерная освещенность объектов на поверхности Земли, вызванная различными свойствами рельефа. Автором разрабатывается процедура восстановления изображений спектральных каналов за счет компенсации искажений от рельефа местности. Цель работы состоит в повышении качества результатов при восстановлении изображений местности с крупными и средними формами рельефа. **Методы.** Исследования основываются на элементах теории цифровой обработки изображений, статистической обработки результатов наблюдений и теории многомерных матриц. **Основные результаты.** Автором введены операции над многомерными матрицами – конкатенация и поэлементное деление. Приведено описание расширенной модели исходных данных о местности. Модель содержит все необходимые данные для восстановления изображений. Автором разработан метод коррекции радиометрических искажений многозональных данных дистанционного зондирования Земли. Метод содержит два этапа: построение эмпирических зависимостей спектрального коэффициента отражения от свойств рельефа и восстановление изображений спектральных каналов по полумпирическим данным. **Практическая значимость.** Новизна исследования состоит в развитии прикладной теории многомерных матриц применительно к обработке многозональных данных совместно с данными о рельефе и объектах местности. Результаты работы могут быть использованы при разработке средств радиометрической коррекции данных. Обработка выполняется на основе цифровой модели рельефа без проведения наземных работ по исследованию отражательных свойств объектов.

Ключевые слова

обработка данных, радиометрическая коррекция, модель данных, цифровая модель рельефа, многомерная матрица, конкатенация, эмпирическая зависимость.

METHOD OF RADIOMETRIC DISTORTION CORRECTION OF MULTISPECTRAL DATA FOR THE EARTH REMOTE SENSING

A.N. Grigoriev^а^аA.F. Mozhaiskiy Military Space Academy, Saint Petersburg, 197198, Russian Federation

Corresponding author: Grig-AN@ya.ru

Article info

Received 20.04.15, accepted 05.06.15

doi:10.17586/2226-1494-2015-15-4-595-602

Article in Russian

For citation: Grigoriev A.N. Method of radiometric distortion correction of multispectral data for the earth remote sensing. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2015, vol.15, no. 4, pp. 595–602.**Abstract**

Subject of Research. The paper deals with technologies of ground secondary processing of heterogeneous multispectral data. The factors of heterogeneous data include uneven illumination of objects on the Earth surface caused by different properties of the relief. A procedure for the image restoration of spectral channels by means of terrain distortion compensation is developed. The object matter of this paper is to improve the quality of the results during image restoration of areas with large and medium landforms. **Methods.** Researches are based on the elements of the digital image processing theory, statistical processing of the observation results and the theory of multi-dimensional arrays. **Main Results.** The author has introduced operations on multidimensional arrays: concatenation and elementwise division. Extended model description for input data

about the area is given. The model contains all necessary data for image restoration. Correction method for multispectral data radiometric distortions of the Earth remote sensing has been developed. The method consists of two phases: construction of empirical dependences for spectral reflectance on the relief properties and restoration of spectral images according to semi-empirical data. **Practical Relevance.** Research novelty lies in development of the application theory of multidimensional arrays with respect to the processing of multispectral data, together with data on the topography and terrain objects. The results are usable for development of radiometric data correction tools. Processing is performed on the basis of a digital terrain model without carrying out ground works connected with research of the objects reflective properties.

Keywords

data processing, radiometric correction, data model, digital terrain model, multidimensional array, concatenation, empirical dependence.

Введение

Тенденции развития оптико-электронных средств регистрации и методов обработки данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) тесно связаны с потребностью повышения степени автоматизации количественных и качественных оценок состояния объектов на поверхности и в толще атмосферы. Сегодня в мировом масштабе можно говорить о значительных достижениях в создании космических и воздушных средств, некоторые из которых обеспечивают высокие частные характеристики данных о подстилающей поверхности по пространственному, спектральному, радиометрическому или временному разрешению. Последний параметр характеризует потенциально возможную периодичность съемки произвольного объекта с применением средства ДЗЗ. Современные отечественные космические системы ДЗЗ (Ресурс-П, Канопус-В и др.) являются достойными представителями существующей на орбите группировки средств наблюдения. В общем виде жизненный цикл данных ДЗЗ после регистрации традиционно включает этапы бортовой обработки, наземной первичной обработки, наземной вторичной (предварительной и тематической) обработки. Сфера применения конкретного вида данных ДЗЗ в значительной степени определяет специфику и состав вторичной обработки, так как предшествующие этапы зависят от особенностей используемой системы ДЗЗ и предназначены для восстановления изображений подстилающей поверхности с коррекцией основных систематических искажений.

В силу значительных вариаций внутренних и внешних условий функционирования космических и воздушных средств, определяющих пространственные, спектральные и временные параметры регистрации, данные ДЗЗ можно характеризовать как разнородные и многомерные. Временные параметры регистрации в исследовании достаточно полно представляются номером суток в календарном году и временем регистрации данных, по значениям которых можно оценить геометрические условия облучения Солнцем произвольного объекта. Перспективными методами тематической обработки, обеспечивающими автоматическое получение оценок объектов, являются методы поиска объектов по спектральным, текстурным и пространственным признакам, тематического картографирования территорий на основе банков спектральных кривых, выявления изменений по мультивременным данным, поиска аномалий подстилающей поверхности [1]. Возможность использования и качество результатов работы таких методов ограничиваются разнородностью данных ДЗЗ, проявляющейся в вариациях признаков объектов-аналогов на зарегистрированных в разных условиях изображениях [2, 3]. В связи с этим важной функцией первичной и вторичной предварительной обработки является повышение однородности данных таким образом, чтобы признаки объектов были близки и их вариации определялись факторами только случайной природы [4].

Технология повышения однородности данных ДЗЗ при предварительной обработке известна [5] и демонстрирует возможность восстановления спектральных свойств интересующих объектов за счет компенсации радиометрических искажений при атмосферной коррекции. Однако подобные технологии исследуются и демонстрируются в основном по данным ДЗЗ на равнинных территориях, имеющих наибольшее социально-экономическое значение. При восстановлении данных, содержащих изображения местности со средними и крупными формами рельефа, результат характеризуется высокой изменчивостью спектральных свойств объектов-аналогов [2] и применим для решения ограниченного перечня задач. Причина состоит в различных условиях освещенности отдельных участков местности, вызванных их разной ориентацией по отношению к удаленному источнику излучения – Солнцу. Этот фактор приводит к существенным отличиям свойств объектов-аналогов, расположенных на участках местности с разным по свойствам рельефом. Яркостные признаки объектов-аналогов могут отличаться в несколько раз [2], что затрудняет применение основных методов автоматизированной тематической обработки. Таким образом, разработка методов коррекции радиометрических искажений многозональных данных ДЗЗ, учитывающих свойства топографии местности, является актуальной и важной задачей в контексте повсеместного использования результатов космической деятельности и работ с воздушными носителями для решения практических задач различного уровня.

Сегодня существуют наработки в области коррекции искажений, вызываемых рельефом местности и условиями освещения [6–8]. Большинство методов коррекции базируется на сопутствующем анализе данных о рельефе местности и традиционно делится на две группы: методы, реализующие эмпириче-

ские/полуэмпирические подходы [9, 10], и методы, основанные на использовании двулучевых функций отражательной способности [11, 12]. К первой группе относятся метод Ламберта, нормализация Минна-ерта, С-коррекция и др., в основе которых лежит использование некоторого единого математического аппарата для расчета зависимости отражательной способности объектов от условий съемки и свойств рельефа. Но свойства объектов подстилающей поверхности очень разнообразны в пространственном и спектральном отношении. Не представляется возможным создать спектральную модель отражения математическими объектами одного вида для объектов с существенно разными отражающими структурами. Например, отражение от однородных грунтовых поверхностей можно считать поверхностным, а входящий поток от растительности отчасти формируется в ее объеме путем многократного переотражения [13]. Для водных объектов глубина проникновения оптического излучения зависит от длины волны и от состояния объекта. Исходя из этого, классические эмпирические методы применимы для решения задачи коррекции искажения только в первом приближении и не могут дать удовлетворительный результат при обработке спектральных данных о местности со сложной объектовой обстановкой. Вторая группа методов компенсирует указанный недостаток первой группы, но требует проведения не всегда возможных и крайне ресурсоемких наземных работ с применением спектрорадиометров и гониометров. Результатом экспериментов являются дискретные измерения коэффициентов отражения объектов в разных условиях. Последний подход с использованием априорных данных может дать хорошие результаты, но при условии существования доступных и полных банков данных с измерениями двулучевых функций отражательной способности для всех интересующих объектов и при наличии пространственных данных о топографии исследуемой местности, что также является отдельным проблемным вопросом.

Таким образом, недостатки существующих методов коррекции радиометрических искажений от рельефа состоят в низком качестве получаемых результатов, что определяется неадекватностью применяемых математических моделей отражения, или в необходимости расходования значительных ресурсов для получения априорных данных. Целью исследования является повышение качества результатов при восстановлении изображений местности с крупными и средними формами рельефа. Для достижения цели требуется решить ряд новых задач по разработке расширенной модели исходных пространственных данных о местности, математического аппарата для построения эмпирических зависимостей спектральных коэффициентов отражения от свойств рельефа и для восстановления изображений спектральных каналов по полуэмпирическим данным. Особенностью исследования является реализация принципов апостериорного построения ограниченных аналогов двулучевых функций отражающей способности и селективной обработки при коррекции спектральных данных о местности со сложной объектовой обстановкой.

Расширенная модель исходных данных о местности

Существующая модель многозонального космического снимка (многоспектрального или гиперспектрального), прошедшего первичную обработку с устранением геометрических искажений, описывает его трехмерной матрицей

$$\mathbf{IM}_{[X_{IM}, Y_{IM}, \Lambda]} = \left\| \left\| im_{x,y,\lambda} \right\|_{X_{IM}, Y_{IM}} \right\|_{\Lambda}^{\Lambda}, \text{ с сечением-изображением } \mathbf{IM}_{[X_{IM}, Y_{IM}, \lambda]} = \left\| im_{x,y} \right\|_{X_{IM}, Y_{IM}}^{\lambda},$$

где $im_{x,y,\lambda}$ – значение пикселя (спектральный коэффициент отражения участка поверхности объекта); x, y – координаты пикселя $im_{x,y,\lambda}$ на изображении; λ – спектральная координата, т.е. номер спектрального канала с известным центром и спектральным разрешением [14]. Пример изображения спектрального канала $\mathbf{IM}_{[X_{IM}, Y_{IM}, \lambda]}$, зарегистрированного с высоким пространственным разрешением и демонстрирующего радиометрические искажения от рельефа местности, приведен на рис. 1, а. Изображения, использованные в исследовании, получены с помощью авиационного видеоспектрометра AVIRIS, имеющего четыре подсистемы регистрации в диапазонах 360–670, 660–1280, 1260–1880, 1880–2500 нм. Спектральное разрешение съемочной аппаратуры в среднем составляет около 10 нм, число спектральных каналов – 224, общий спектральный диапазон – от 360 до 2500 нм, значения яркости – спектральные коэффициенты отражения (СпКО), месяц съемки – август 2013 года.

Представленная модель исходных данных недостаточна для решения задачи коррекции рассматриваемого типа радиометрических искажений. Она требует расширения, которое заключается в добавлении данных о свойствах рельефа и принадлежности к некоторому классу объектов для каждого элемента $im_{x,y}$. Традиционной формой хранения данных о рельефе является цифровая модель рельефа (ЦМР), которая, в свою очередь, может использовать сеточное, триангуляционное или структурное описание поверхности¹. На практике за счет простоты и возможности хранения больших объемов данных наиболь-

¹ ГОСТ Р 52440-2005. Модели местности цифровые. Общие требования. Введ. 28.12.2005. М.: Стандартинформ.

шее распространение получили сеточные ЦМР, пример которых приведен на рис. 1, б. Такую ЦМР можно представить в виде двумерной матрицы

$$\mathbf{EL}_{[X_{EL}, Y_{EL}]} = \|el_{x,y}\|_{X_{EL}, Y_{EL}},$$

где $el_{x,y}$ – абсолютное значение высоты в точке x, y в используемой системе высот.

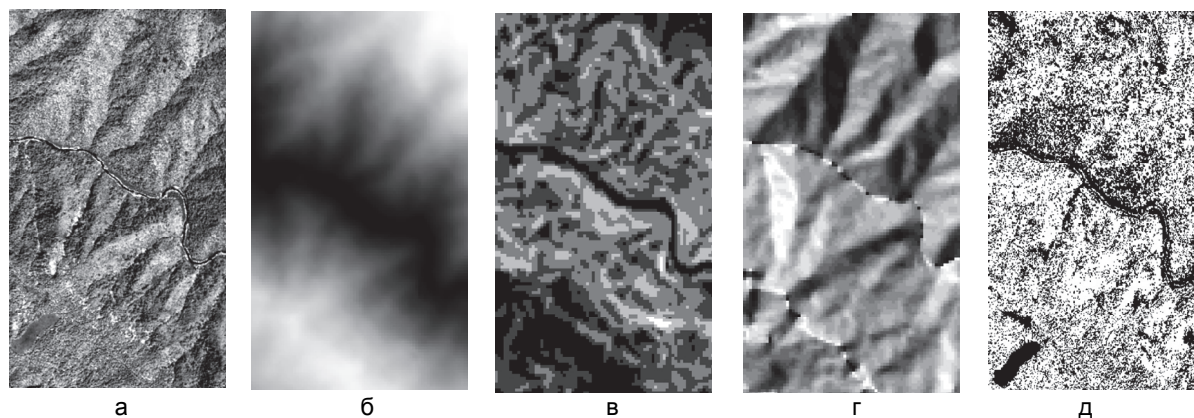


Рис. 1. Фрагменты изображений спектрального канала с центром 800 нм (а), исходной ЦМР (б) и результатов ее обработки: дискретизованных уклонов (в); азимутов уклонов (г), карты густой растительности (д). Размеры изображений 2×3,5 км

В контексте исследования интерес представляет не ЦМР, а производные на ее основе продукты, определяющие ориентацию каждого элементарного участка местности – окрестности точки x, y – по отношению к Солнцу. К таким производным относятся матрицы уклонов $\mathbf{SL}_{[X_{EL}, Y_{EL}]}$ и матрица их азимутов $\mathbf{AZ}_{[X_{EL}, Y_{EL}]}$, для всех точек x, y , примеры которых приведены на рис. 1, в, г. Эти данные рассчитываются при локальной обработке данных ЦМР $\mathbf{EL}_{[X_{EL}, Y_{EL}]}$ за счет интерполяции поверхности в пределах окна с центром x, y . Причем азимуты уклонов $az_{x,y}$, в отличие от традиционного понятия в картографии, отсчитываются от направления на Солнце в диапазоне $(-180^\circ; +180^\circ)$. Уклоны $sl_{x,y}$ и азимуты $az_{x,y}$ представлены непрерывными полями значений и в рамках исследований дискретизируются с шагом в 10° . Дискретизованные значения уклонов $dsl_{x,y}$ и азимутов $daz_{x,y}$ составляют соответствующие матрицы $\mathbf{DSL}_{[X_{EL}, Y_{EL}]}$ и $\mathbf{DAZ}_{[X_{EL}, Y_{EL}]}$, $[dsl_{x,y} = 0(10)DSL]$, $[daz_{x,y} = 0(10)DAZ]$. Подробнее аспекты обработки ЦМР и ее производных изложены в литературе [2].

Как было отмечено, свойства отражения солнечного излучения сильно различаются для некоторых классов объектов местности [13]. В связи с этим области изображения с разными объектами должны корректироваться с разными параметрами, для чего необходимо знать пространственное распределение объектов по изображению, т.е. иметь карту местности. В рамках исследования предлагается построение карты по результатам расчета известного спектрального отношения – нормализованного разностного вегетационного индекса NDVI по данным, зарегистрированным в красном (630–690 нм) и ближнем инфракрасном (760–900 нм) каналах аппаратуры. Индекс принимает значения из диапазона $(-1; 1)$, и дискретная шкала сопоставления с основными классами объектов, имеющая шаг 0,1, хорошо проработана на практике. Пример бинарной карты класса объектов, построенной по индексу NDVI, приведен на рис. 1, д.

Карта классов объектов $\mathbf{DCD}_{[X_{IM}, Y_{IM}]}^{\mathbf{IM}}$ с числом дискретных классов DCN рассчитывается по исходному снимку $\mathbf{IM}_{[X_{IM}, Y_{IM}]}$ и наследует его пространственные размеры X_{IM}, Y_{IM} :

$$\mathbf{DCD}_{[X_{IM}, Y_{IM}]}^{\mathbf{IM}} = \|dcd_{x,y}\|_{X_{IM}, Y_{IM}}; dcd = [1(1)DCN],$$

где dcd – номер класса объектов из DCN возможных, число которых при шаге дискретизации 0,1 для значений NDVI составляет $DCN \leq 20$.

Таким образом, единая расширенная модель исходных данных в задаче радиометрической коррекции искажений от рельефа должна объединять космический многозональный снимок $\mathbf{IM}_{[X_{IM}, Y_{IM}, \lambda]}$, матрицы уклонов $\mathbf{SL}_{[X_{EL}, Y_{EL}]}$ и $\mathbf{DSL}_{[X_{EL}, Y_{EL}]}$, матрицы азимутов уклонов $\mathbf{AZ}_{[X_{EL}, Y_{EL}]}$ и $\mathbf{DAZ}_{[X_{EL}, Y_{EL}]}$, карту классов объектов $\mathbf{DCD}_{[X_{IM}, Y_{IM}]}^{\mathbf{IM}}$. Основной проблемой строгого объединения могут быть различные простран-

венные свойства перечисленных данных. К ним относятся картографические проекции и датумы, в которых определены данные; разные шаги пространственной дискретизации и, как следствие, отличающиеся размеры матриц-моделей X_{IM}, Y_{IM} и X_{EL}, Y_{EL} . Указанная трудность преодолима с использованием методов перепроецирования и согласованной пространственной интерполяции изображений, реализованных в современных программных комплексах обработки пространственных данных. Исходные данные, преобразованные в пространственном отношении к общим размерам X, Y , объединяются в единую матрицу исходных данных $ID_{[X,Y,W]}$, для чего в дополнение к существующим операциям над многомерными матрицами [15] вводится новая операция конкатенации двумерных и трехмерных матриц:

$$ID_{[X,Y,W]} = IM_{[X,Y,\Lambda]} \parallel_{XY} DCD_{[X,Y]}^{IM} \parallel_{XY} SL_{[X,Y]} \parallel_{XY} DSL_{[X,Y]} \parallel_{XY} AZ_{[X,Y]}^{SL} \parallel_{XY} DAZ_{[X,Y]}^{SL} = \parallel id_{x,y,w} \parallel_{X,Y}^W,$$

где « \parallel » – обозначение операции конкатенации, в котором нижние индексы определяют сечение для объединения матриц; $W = \Lambda + 5$ – общее число сечений исходных данных. Операция конкатенации при необходимости может быть расширена на случай работы с матрицами, имеющими большее количество измерений.

Расширенная модель исходных данных для радиометрической коррекции искажений от рельефа получена за счет объединения многомерных матриц с помощью операции конкатенации. Объединяемые матрицы содержат данные космической многозональной съемки, карту объектов местности и продукты обработки рельефа, которые предварительно согласованы по пространственным параметрам. На основе разработанной модели реализуется метод коррекции радиометрических искажений, в котором заложен принцип построения зависимостей спектрального отражения от свойств рельефа для каждого существующего класса объектов на основе статистического анализа данных исходного многозонального снимка.

Построение эмпирических зависимостей СпКО от свойств рельефа

Все необходимые данные для оценивания СпКО объектов некоторого класса dcn при ориентации, заданной уклоном dsl и азимутом daz , содержатся в матрице исходных данных $ID_{[X,Y,W]}$. Для спектрального канала λ задача решается построением выборки по сечению матрицы $ID_{[X,Y,\lambda]} = \parallel id_{x,y} \parallel_{X,Y}^\lambda$, содержащей элементы $id_{x,y}$, для которых задан конкретный класс объектов $dcn_{x,y} = dcn$ и ориентация $dsl_{x,y} = dsl$, $daz_{x,y} = daz$. С практической точки зрения для построения выборки удобно использовать бинарную маску $MC_{[X,Y]}(dcn, dsl, daz)$, значения элементов которой определяется следующим логическим выражением:

$$mc_{x,y}(dcn, dsl, daz) = \begin{cases} 1, & (dcn_{x,y} = dcn) \wedge (dsl_{x,y} = dsl) \wedge (daz_{x,y} = daz); \\ 0, & (dcn_{x,y} \neq dcn) \vee (dsl_{x,y} \neq dsl) \vee (daz_{x,y} \neq daz). \end{cases}$$

Поэлементное перемножение матриц $ID_{[X,Y,\lambda]}$ и $MC_{[X,Y]}$, обозначаемое знаком « \boxtimes » [15], определит матрицу выборки

$$ID_{[X,Y,\lambda]}^*(dcn, dsl, daz) = ID_{[X,Y,\lambda]} \boxtimes MC_{[X,Y]}(dcn, dsl, daz),$$

в которой необходимо рассматривать ненулевые элементы $id_{x,y}^* \neq 0$. Вектор значений СпКО $ID_{\langle EN^* \rangle, \lambda}^*(dcn, dsl, daz)$, сформированный по ненулевым элементам матрицы $ID_{[X,Y,\lambda]}^*(dcn, dsl, daz)$, число которых равно EN^* , содержит выборку для оценивания СпКО класса объектов dcn . На практике исходные данные о рельефе и карта классов объектов неидеальны и содержат ошибки, поэтому для повышения качества результата в исследовании среди значений $ID_{\langle EN^* \rangle, \lambda}^*(dcn, dsl, daz)$ выполняется отбраковка результатов грубых измерений СпКО, после которой формируется новый вектор $ID_{\langle EN^{**} \rangle, \lambda}^{**}(dcn, dsl, daz)$ с числом элементов $EN^{**} \leq EN^*$. Оценкой СпКО класса объектов dcn при заданных значениях dsl , daz принято вычисленное по значениям элементов вектора $ID_{\langle EN^{**} \rangle, \lambda}^{**}(dcn, dsl, daz)$ среднее арифметическое $\tilde{M}_{id^*, \lambda} \left(ID_{\langle EN^{**} \rangle, \lambda}^{**}(dcn, dsl, daz) \right)$. Полученные таким образом для всех спектральных каналов λ оценки СпКО составляют массив $ER_{[\Lambda, DCN, DSL, DAZ]}$, на основании которого для класса объектов dcn можно по-

строить зависимость СпКО от свойств рельефа. Примеры таких эмпирических зависимостей $\tilde{M}_{id^{**},\lambda}$ от азимута daz при фиксированном уклоне dsl для разных классов объектов dcn и спектральных каналов λ приведены на рис. 2.

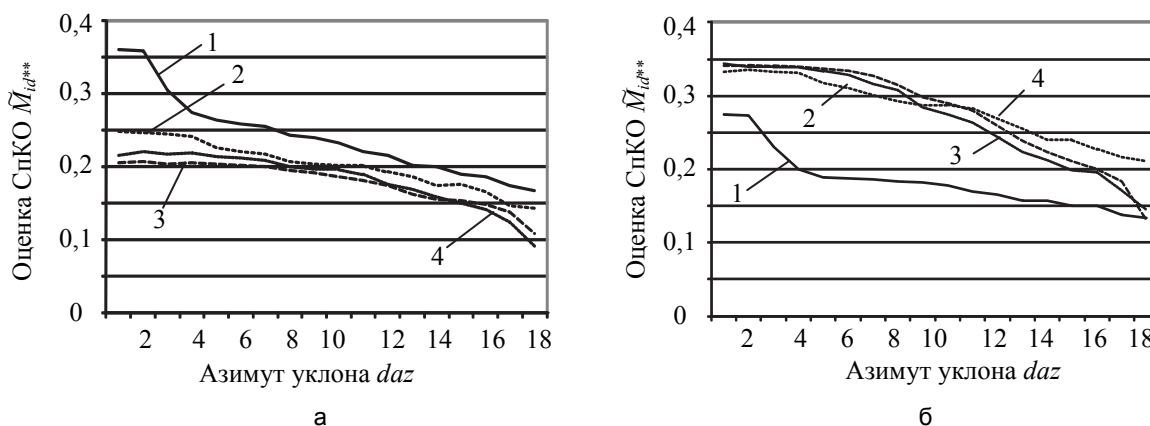


Рис. 2. Эмпирические зависимости $\tilde{M}_{id^{**}}$ при $dsl = 20^\circ$ для каналов λ с центрами 800 (а) и 1300 нм (б):
 1 – густая растительность; 2 – разреженная растительность; 3 – открытая почва;
 4 – скальные и минеральные грунты

Вид полученных при экспериментах эмпирических зависимостей подтверждает предположение, что свойства спектрального отражения объектов различных классов на всем диапазоне изменения условий нельзя качественно представить одной аналитической моделью.

Восстановление изображений спектральных каналов по полуэмпирическим данным

Полученный массив оценок СпКО $ER_{[\lambda,DCN,DSL,DAZ]}$ служит основой для решения задачи пересчета значения исходного значения СпКО из массива $ID_{[X,Y,\Lambda]}$ к некоторым общим условиям. На практическом уровне сущность устранения искажений от рельефа состоит в получении изображения местности без помех, вносимых разной освещенностью участков, т.е. в идеальном случае гористая местность должна на снимке изображаться равниной. На данном этапе исследования такой эффект является реализуемым, так как среднее значение элементов сечения $\tilde{M}_{er}(ER_{[\lambda,dcn,1,DAZ]})$, содержащее оценки СпКО $er_{\lambda,dcn,dsl,daz}$ для малых уклонов dsl и существующих значений азимутов daz , будет оценкой СпКО класса объектов dcn , к которой надо пересчитать оценки СпКО этого класса для всех существующих вариантов исходных sl, az . Задача расчета оценки СпКО $er_{\lambda,dcn,sl,az}$ для произвольных значений sl, az решается методом двумерной билинейной интерполяции значений СпКО в пространстве уклон-азимут по заданной окрестности. Частные от значений $er_{\lambda,dcn,sl,az}$ и $\tilde{M}_{er}(ER_{[\lambda,dcn,1,DAZ]})$ будут коэффициентами восстановления элементов изображения $cc_{\lambda,dcn,sl,az}$, соответствующих классу dcn , уклону sl и азимуту az , на основе которых при известном распределении элементов sl, az по сечениям $ID_{[X,Y,\Lambda+2]}$ и $ID_{[X,Y,\Lambda+4]}$ создается матрица коэффициентов коррекции $CC_{[X,Y,\Lambda]}$. Примеры изображений сечений матрицы $CC_{[X,Y,\lambda]}$ для спектральных каналов λ с центрами 800 и 1300 нм приведены на рис. 3, а, в, соответственно.

Поэлементное деление подматрицы $ID_{[X,Y,(1)\Lambda]}$ на матрицу $CC_{[X,Y,\Lambda]}$ дает матрицу радиометрически восстановленных изображений $IM'_{[X,Y,\Lambda]}$:

$$IM'_{[X,Y,\Lambda]} = ID_{[X,Y,(1)\Lambda]} \overline{[]} CC_{[X,Y,\Lambda]},$$

где « $\overline{[]}$ » – обозначение операции поэлементного деления матриц.

Примеры визуализированных сечений матрицы $CC_{[X,Y,\Lambda]}$ – восстановленных изображений спектральных каналов λ с центрами 800 и 1300 нм – приведены на рис. 3, б, г, соответственно. Первые экспериментальные исследования разработанного метода радиометрической коррекции в первом приближении подтвердили его робастность. Получаемые результаты визуально демонстрируют «выравнивание» яркости изображения объектов на разных формах рельефа, однако присутствуют невосстановленные области

в районе структурных линий рельефа – тальвегов и водоразделов. Этот эффект связывается с более низкой, приблизительно на порядок, детальностью данных о рельефе по отношению к данным многозональной съемки, который недостаточно точно описывает локальные изменения рельефа. Кроме того, предполагается разработка методики оценивания качества метода радиометрической коррекции для сравнения полученного результата с существующими методами, позволяющими компенсировать рассматривать искажения.

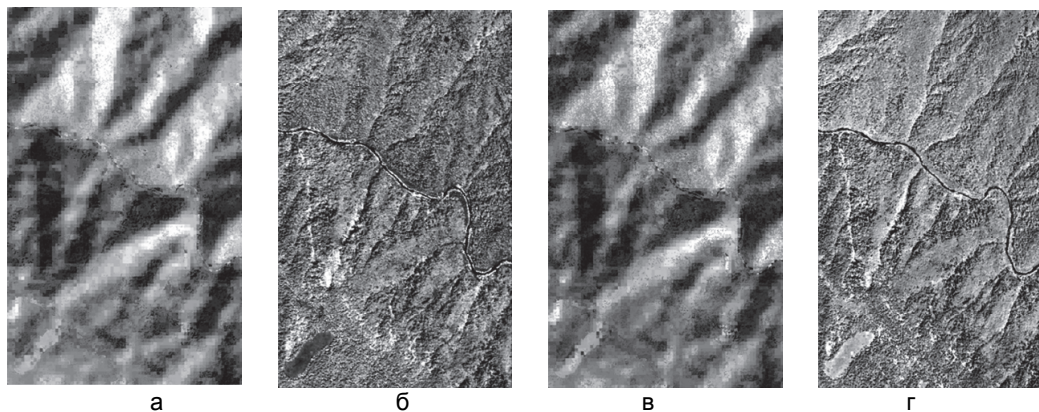


Рис. 3. Частные результаты эксперимента по радиометрической коррекции искажений от рельефа: а, в – матрицы коэффициентов коррекции; б, г – соответствующие восстановленные изображения. Размеры изображений 2×3 км

Заключение

Выполненное исследование содержит описание расширенной модели исходных данных о местности, необходимых для решения задачи восстановления спектральных отражательных свойств объектов на изображениях территорий со средними и крупными формами рельефа. Представлено содержание метода коррекции радиометрических искажений, включающего этапы построения эмпирических зависимостей спектральных коэффициентов отражения от свойств рельефа и восстановления изображений спектральных каналов по полуэмпирическим данным. Особенность метода состоит в использовании предварительного грубого распознавания классов объектов на многозональном снимке по индексу NDVI для индивидуального поклассового оценивания зависимостей отражения от свойств рельефа и использования результатов интерполяции полученных зависимостей для обработки. В работе введены нестандартные операции вычисления многомерных матриц, моделирующих массивы пространственных данных.

Результаты исследования опробованы на реальных гиперспектральных снимках высокого пространственного разрешения. Дальнейшие исследования коррекции радиометрических искажений будут направлены на сравнение с существующими аналогами в области обработки аэрокосмических снимков и анализа зависимости качества результатов от параметров исходных данных.

References

1. Grigor'ev A.N. Perspektivy vozdušno-kosmicheskogo monitoringa s ispol'zovaniem sredstv giperspektral'noi s'emki [Prospects for aerospace monitoring with the use of hyperspectral survey]. *Sbornik Trudov I Vserossiiskoi Konferentsii Molodykh Uchenykh Nauka i Innovatsii XXI Veka* [Proc. All-Russian Conference of Young Scientists Science and Innovation XXI Century]. Surgut, Russia, 2012, pp. 15–19.
2. Grigor'ev A.N. Issledovanie topograficheskikh radiometricheskikh iskazhenii dannykh kosmicheskoi giperspektral'noi s'emki [Research of topographic data radiometric distortion of space hyperspectral survey]. *Kontenant*, 2013, vol. 12, no. 1, pp. 50–57.
3. Grigor'ev A.N., Shilin B.V. Analysis of seasonal variations of the spectral characteristics of landscape components, using the data of the Hyperion space video spectrometer. *Journal of Optical Technology (A Translation of Opticheskii Zhurnal)*, 2013, vol. 80, no. 6, pp. 360–362. doi: 10.1364/JOT.80.000360
4. Vicente-Serrano S., Perez-Cabello F., Lasanta T. Assessment of radiometric correction techniques in analyzing vegetation variability and change using time series of Landsat images. *Remote Sensing of Environment*, 2008, vol. 112, no. 10, pp. 3916–3934. doi: 10.1016/j.rse.2008.06.011.
5. Grigor'ev A.N. The method of formation of objects spectral characteristics on the basis of multitemporal data of space hyperspectral remote sensing. *Sovremennye Problemy Distantionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*, 2014, vol. 11, no. 2, pp. 175–184. (in Russian)
6. Richter R., Kellenberger T., Kaufmann H. Comparison of topographic correction methods. *Remote Sensing*, 2009, vol. 1, no. 3, pp. 184–196. doi: 10.3390/rs1030184.

7. Liu C., Li N., Li X., Zhao H. The research by topographic correction methods of airborne hyperspectral remote sensing data based on DEM. *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering*, 2014, vol. 9260, art. 926049. doi: 10.1117/12.2069395.
8. Vanonckelen S., Lhermitte S., Balthazar V., Van Rompaey A. Performance of atmospheric and topographic correction methods on Landsat imagery in mountain areas. *International Journal of Remote Sensing*, 2014, vol. 35, no. 13, pp. 4952–4972. doi: 10.1080/01431161.2014.933280.
9. Gao Y., Zhang W. A simple empirical topographic correction method for ETM+ imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 2009, vol. 30, no. 9, pp. 2259–2275. doi: 10.1080/01431160802549336
10. Wang L., Wang Q. A new semi-empirical topographic correction method for optical remote sensing imagery in rugged terrain. *Proc. SPIE Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering*, 2010, vol. 7841, art. 784108. doi: 10.1117/12.873155
11. Zhang W., Gaob Y. Topographic correction algorithm for remotely sensed data accounting for indirect irradiance. *International Journal of Remote Sensing*, 2011, vol. 32, no. 7, pp. 1807–1824. doi: 10.1080/01431161003623441.
12. Lenot X., Achar V., Poutier L. A new approach to atmospheric and topographic corrections for hyperspectral imagery. *Remote Sensing of Environment*, 2009, vol. 113, no. 8, pp. 1664–1677. doi: 10.1016/j.rse.2009.03.016.
13. Markov A.V., Grigor'eva O.V., Chapurskii L.I., Mochalov V.F. Metody podgotovki etalonnnoi informatsii dlya obrabotki materialov mnogo- i giperspektral'noi aerokosmicheskoi s'emki v zadache monitoringa prirodnoi sredy [Methods of preparing standard information for multi-material processing and hyperspectral aerospace shooting in the problem of environmental monitoring]. *Trudy III Vserossiiskoi Nauchnoi Konferentsii "Problemy Voенno-Prikladnoi Geofiziki i Kontrolya Sostoyaniya Prirodnoi Sredy"* [Proc. III All-Russian Scientific Conference "Problems of Military-Applied Geophysics and Environmental Control"]. St. Petersburg, 2014, vol. 2, pp. 324–332.
14. Grigor'ev A.N. Metod sokrashcheniya izbytochnosti giperspektral'nykh dannykh distantsionnogo zondirovaniya Zemli [The method of reducing redundancy of hyperspectral remote sensing data]. *Raketo-Kosmicheskoe Priborostroenie i Informatsionnye Tekhnologii*, 2012, pp. 69–77.
15. Titkov B.V., Shabakov E.I. Operator lineinoi fil'tratsii ob'emnogo izobrazheniya v imitatsionnom modelirovaniy televizionnoi sistemy [The operator of linear filtering in 3D image simulation television system]. *Tekhnika Sredstv Svyazi*, 1984, no. 2, pp. 69–76.

Григорьев Андрей Николаевич

– кандидат технических наук, докторант, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург, 197198, Российская Федерация, Grig-AN@ya.ru

Andrey N. Grigoriev

– PhD, postdoctoral student, A.F. Mozhaitskiy Military Space Academy, Saint Petersburg, 197198, Russian Federation, Grig-AN@ya.ru