

Имитационная модель преобразования снимков авиационного гиперспектрометра на условия наблюдения из космоса

В.Н. Остриков, О.В. Плахотников, К.М. Шулика

*Санкт-Петербургский филиал ОАО «КБ «ЛУЧ»
197376, г. Санкт-Петербург, ул. Академика Павлова, д.14а
E-mail: luchspb@rambler.ru*

Статья описывает имитационную модель синтеза гиперспектральных изображений космических датчиков по результатам авиационной съемки. Рассмотрена предварительная обработка исходных данных. Для учета среды переноса сигнала используется оптическая модель атмосферы MODTRAN 5.2. Приведен пример пересчета данных авиационной съемки на космические условия наблюдения.

Ключевые слова: гиперспектральная съемка, предварительная обработка данных, имитационное моделирование.

В последние десятилетия и в настоящее время за рубежом для решения народно-хозяйственных задач успешно используется аппаратура получения видовых данных из космоса, формируемых оптико-электронными системами гиперспектральной съемки (ГСС). Для практической отработки методов спектрального анализа снимков из космоса широко используются данные авиационной съемки. Поскольку, в силу ряда причин, эти снимки не вполне адекватны результатам космического наблюдения, возможно применение модельных имитаторов их пересчета. С этой целью разработана имитационная модель, которая преобразует данные авиационной съемки с учетом возможных условий и параметров имитируемой аппаратуры в спектральном интервале 0.4-0.9 мкм, на космические условия. В ходе ее реализации первым этапом является первичная обработка данных ГСС с целью повышения качества, затем проводится преобразование спектральных векторов в распределения коэффициентов спектральной яркости (КСЯ) путем калибровки и осуществляется собственно пересчет на космический датчик. Для исследования влияния пересчета проводится вторичная калибровка имитируемых данных с преобразованием в КСЯ.

В ходе первичной обработки исходный гиперспектральный «куб» авиационного снимка подвергается коррекции для снижения радиометрического и спектрального шума. Поскольку радиометрический шум в ходе применения сканирующих приборов, к коим относятся в настоящее время практически все приборы ГСС (как авиационного, так и космического базирования), имеет явно выраженные регулярные составляющие, данные подвергаются обработке корректором полосового шума. Широко известные и используемые в настоящее время методы (Шовенгердт, 2010) не вполне адекватны рассматриваемой задаче. Поэтому для более эффективной коррекции используется специальный метод, основанный на адаптивном пространственно-спектральном разделении исходного изображения с последующей обработкой высокочастотной составляющей (Остриков и др., 2010), свободный от указанных недостатков.

Пример применения метода приведен на рис. 1 для исходного полутонового образа на средней линии участка спектра (снимок получен аппаратурой «Сокол» (ФНПЦ ОАО «Красногорский завод им. С.А. Зверева»). Визуально наблюдается снижение полосового шума в результате применения метода. Кроме того, на том же рисунке демонстрируется выявление кадровой неравномерности снимка и результата его компенсации.

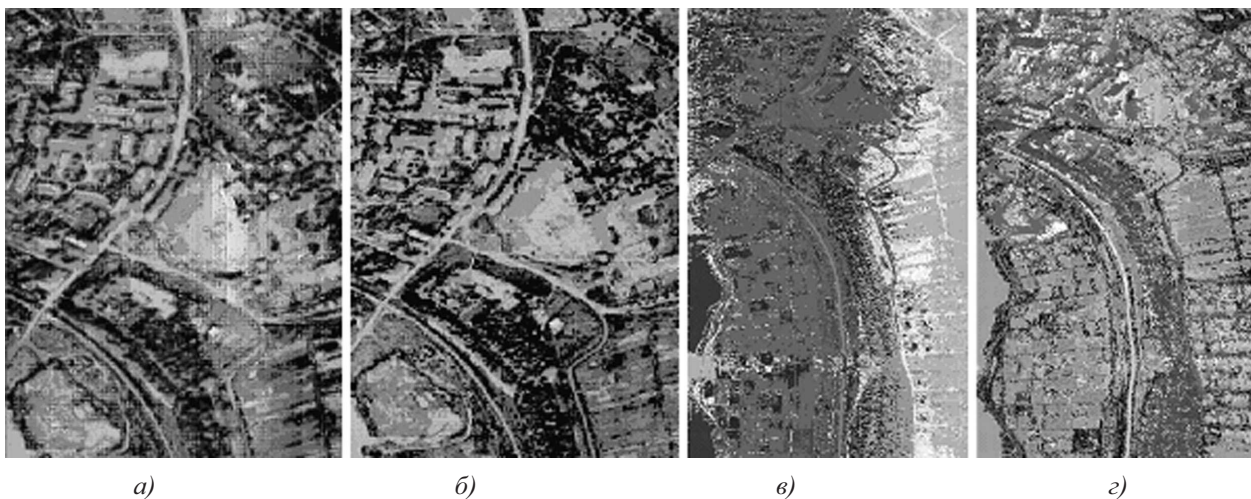


Рис. 1. Результат обработки искажений данных авиационной ГСС на средней линии спектра (аппаратура «Сокол»): а) исходный фрагмент, б) результат коррекции полосовых шумов фрагмента, в) индикация кадровой неравномерности снимка, г) результат коррекции кадровой неравномерности

Помимо регулярных искажений, на спектральных «кубах» данных всегда присутствует случайный регистрационный шум. Для его частичной компенсации обычно применяется (Шовенгердт, 2010), метод главных компонент. Его суть состоит в сжатии исходного «куба» на ортогональном пространстве с отбрасыванием части векторов. Уровень сжатия определяется соответствием полученной разности случайному шуму, величина которого оценивается в ходе специальной тестовой съемки.

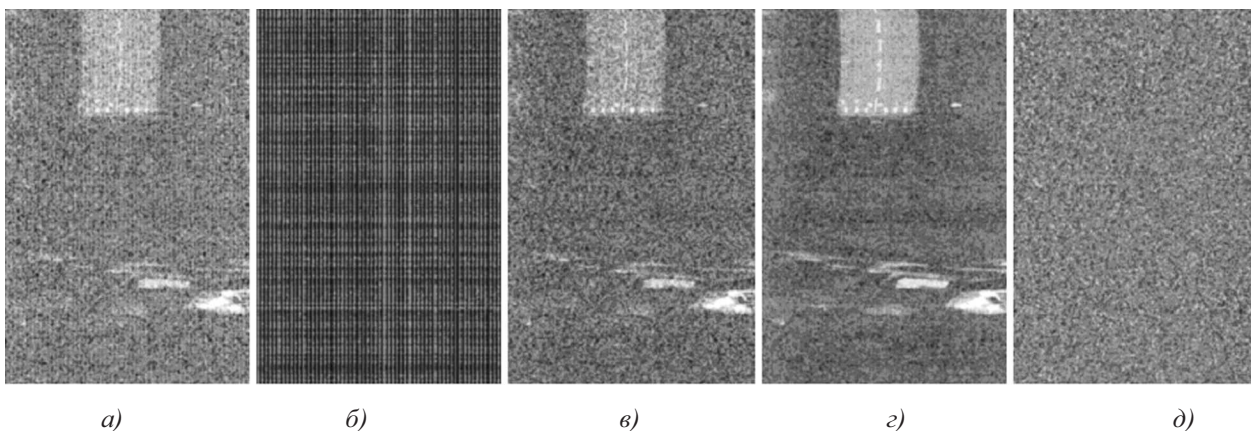


Рис. 2. Результат последовательной обработки данных авиационной ГСС: а) исходный фрагмент, б) выделенный полосовой шум, в) результат коррекции полосового шума, г) результат коррекции случайного шума, д) выделенный случайный шум

Пример последовательной компенсации полосового и аппаратурного шума, применительно к аппаратуре ЗАО «НПО «Лептон», на одной линии спектра, приведен на рис. 2. В общем случае первичная обработка данных авиационной съемки также включает в себя компенсацию пространственного размытия, которая строится для образов на каждой спектральной линии отдельно, разработанным методом «слепого восстановления» (Остриков, 2011).

После комплексной компенсации шумов, радиометрической кадровой неравномерности и размытия, к полученному «кубу» применяется внешняя калибровка, состоящая в пересчете спектральных сигналов «куба» в КСЯ. Для этого съемка осуществляется таким образом, чтобы в зону полученного кадра попадал участок тестовой поверхности, среднее значение КСЯ которого синхронно (или квазисинхронно) измеряется наземной аппаратурой (в дан-

ном случае это спектрорадиометр FieldSpec с разрешением около 3,5 нанометров). Результаты обработки данных показали, что используемые тестовые поверхности и методика калибровки обеспечивает точность, оцениваемую по сравнению средних значений авиационных и наземных измерений КСЯ, в пределах 5%, что существенно ниже вариабельности данных по отдельным поверхностям урбанизированных сцен.

После конвертации данных в КСЯ имитационная модель преобразует исходный «куб» на космические условия. Пересчет распределений КСЯ $\rho_j(\lambda)$ в сигналы приемников $s_j(\lambda)$ определяется выражением, учитывающим априорно заданное спектральное разрешение гиперспектрометра космического базирования:

$$s_{ij}(\lambda) = p t_n \delta^2 \sum_{k=1}^L \{ \tau_p(\lambda_k) \eta(\lambda_k) \Delta_{o\lambda} C(\rho_{ij}(\lambda_k)) \}, \quad (1)$$

где $p = d^2(1 - \varepsilon^2) / 4f_p^2$ - угловой параметр апертуры прибора, ij - текущие индексы двумерного распределения на приемной матрице, L - число интервалов спектральной дискретизации отдельного канала (зависит от ширины каждой спектральной линии) на средней длине волны λ . Параметры аппаратуры: d - размер входного отверстия объектива, f_p - фокусное расстояние, δ - размер элементарного приемного элемента (предполагается квадратным), ε - отношение диаметров вторичного и первичного зеркал. t_n - время накопления, $\eta(\lambda_k)$ - спектральная чувствительность приемника, $\tau_p(\lambda_k)$ - спектральное пропускание прибора, $\Delta_{o\lambda}$ - интервал спектральной дискретизации (1 нм). $C(\rho_{ij}(\lambda_k))$ - спектральная плотность энергетической яркости на апертуре в зависимости от КСЯ текущего элемента ij , рассчитывается с использованием модели MODTRAN 5.2 с учетом метеорологической дальности видимости (МДВ), типа аэрозоля, текущей даты наблюдения (высоты Солнца). Используемая версия модели атмосферы позволяет учитывать свойства аэрозоля на трассе переноса сигнала со спектральной дискретностью, соответствующей 0.1 см-1. Расчет сигнала $s_f(\lambda)$ от фоновой облученности для оценки спектрального шума в канале производится на основе (1) для заданного значения спектрального альбеда.

Оценка спектральных значений среднеквадратических отклонений (СКО) шума в спектральных каналах проводится опосредованно, для чего сначала рассчитывается отношение сигнала к шуму [Гудмен, 1988]:

$$\zeta(\lambda) = N_f(\lambda) / k_s \sqrt{\sigma_f^2(\lambda) + 2\sigma_p^2(\lambda)}, \quad (2)$$

где $N_f(\lambda)$ - уровень фотонного шума, $\sigma_p^2(\lambda)$ - дисперсия собственных шумов приемных элементов (число шумовых электронов), $\sigma_f^2(\lambda)$ - дисперсия фонового шума. Коэффициент k_s учитывает случайные и частично регулярные шумы на сформированных снимках. Если эти шумы хорошо скомпенсированы в ходе первичной обработки, можно принять. Тогда СКО шума в спектральных каналах:

$$\sigma(\lambda) = s_f(\lambda) / \zeta(\lambda). \quad (3)$$

В том случае, когда влияние абберационного размытия каналов выше, чем это обусловлено скорректированными исходными данными авиационной съемки, дополнительное размытие моделируется на основе линейной теории оптических систем (Остриков, Плахотников, 2006). На полученные размытые образы аддитивно накладывается нормальный шум (3), уровень которого также корректируется с учетом остаточного шума после первичной обработки данных авиационной съемки.

Ниже рассмотрен пример пересчета авиационного снимка, полученного в средней полосе, летом, аппаратурой «Сокол» с исходным пространственным разрешением один метр, число спектральных каналов прибора - 105 на интервале 0,4-0,9 мкм, спектральное разрешение от

4,5 до 7 нанометров. Исходный «куб» предварительно был обработан принятыми методами для снижения уровней полосового и случайного шума и пространственного размытия данных (по каждому каналу отдельно), после чего приведен, на основе внешней калибровки, к пространственному распределению КСЯ. Для учета условий наблюдений взята модель среднеширотной атмосферы с МДВ=23 км (городской аэрозоль), для ясной погоды, высота Солнца 50 градусов. Высота орбиты наблюдения 425 км, входная апертура - 0,5 метра, размер квадратных элементов приемной матрицы - 9 нанометров, имитируемой спектральное разрешение (равномерно по спектру) и ширина регистрируемой спектральной линии - 5 нанометров. Время экспонирования определялось условием смаза в один элемент в процессе сканирования поля зрения. На рис. 3 приведен результат распознавания искусственных образований (дороги, строения и т.д.) по исходному спектральному «кубу», полученному авиационной съемкой (а) и по «кубу», пересчитанному на принятые выше условия наблюдения из космоса (б). Анализ приведенного примера позволяет оценить снижение вероятности распознавания, по этому типу спектральных элементов снимка (в данном случае - на 42%), обусловленный пересчетом данных. Другими словами, условия наблюдения и свойства аппаратуры формирования имитируемого снимка неизбежно вносят ошибки в получение конечного результата, что наиболее важно в данном случае, в спектральные свойства наблюдаемых объектов.

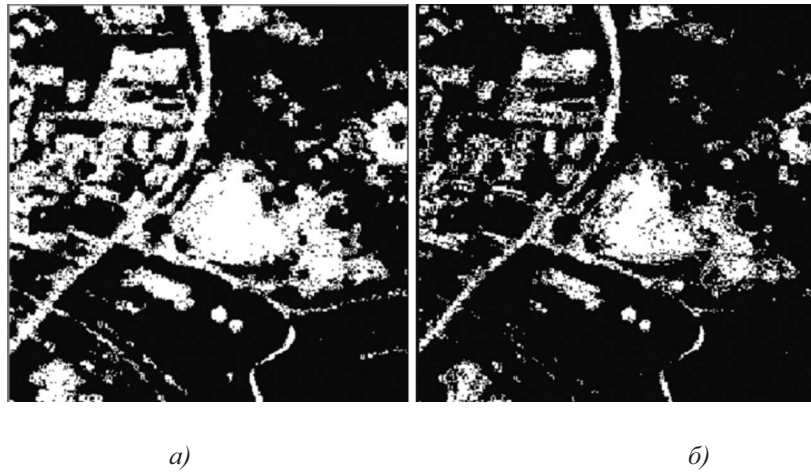


Рис. 3. Результат распознавания искусственных образований (дороги, строения и т.д.) по исходному спектральному «кубу», полученному авиационной съемкой (а) и по «кубу», пересчитанному на принятые выше условия наблюдения из космоса (б)

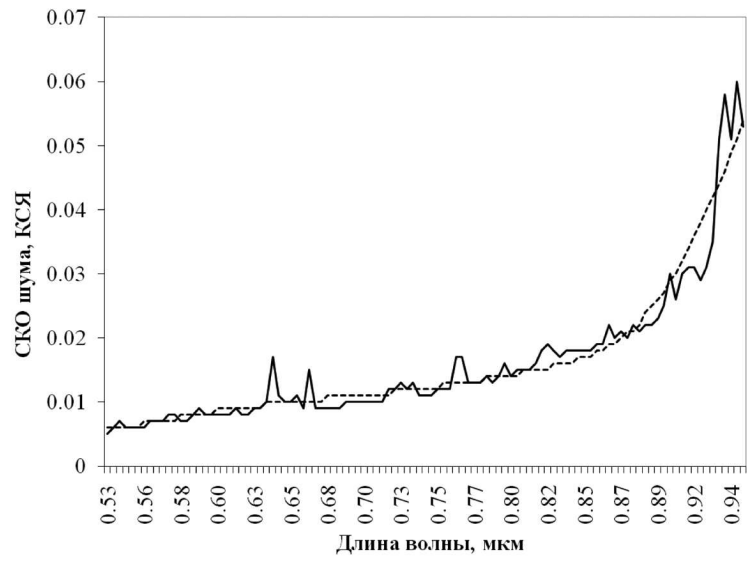


Рис. 4. График спектральной зависимости рассчитанной оценки СКО шума в единицах КСЯ, на пересчитанном «кубе» (пунктирная кривая - результат сглаживания)

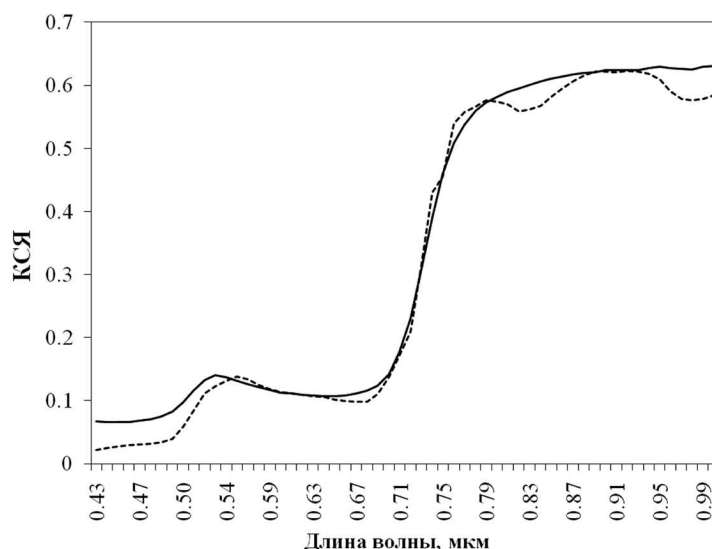


Рис. 5. Спектральные ходы средних значений коэффициентов яркости окрашенного зеленой краской отдельного объекта до и после пересчета на космические условия наблюдения (пунктирная кривая)

На рис. 4 приведен график спектральной зависимости рассчитанной оценки СКО шума в единицах КСЯ, на пересчитанном «кубе» (пунктирная кривая – результат сглаживания). На рис. 5 – спектральные ходы средних значений коэффициентов яркости окрашенного зеленой краской отдельного объекта до и после пересчета на космические условия наблюдения (пунктирная кривая).

Разработанная модель верифицирована по отдельным элементам пересчета - по учету уровней спектрального шума, пространственного размытия и влиянию трассы на основе результатов авиационной и сопутствующей наземной аппаратурной съемки.

Литература

1. Гудмен Дж. Статистическая оптика / М.: Мир, 1988. 527с.
2. Остриков В.Н. Оценка функции рассеяния точки на произвольном снимке посредством слепого восстановления // Материалы научно-технической конференции «Техническое зрение в системах управления-2011». Сборник докладов. ИКИ РАН. 2011.
3. Остриков В.Н., Плахотников О.В. Идентификация функции рассеяния точки канала наблюдения по калибрующему изображению посредством метода наименьших квадратов // Оптический журнал. 2006. Т.73. № 2. С. 26–30.
4. Остриков В.Н., Плахотников О.В., Соболев А.А., Шулика К.М. Адаптивная строчная радиометрическая коррекция для компенсации аппаратного строчного шума данных гиперспектральной съемки // VII открытая всероссийская конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Тезисы докладов ИКИ РАН. 2010. С.14–15.
5. Шовенгердт Р.А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений: Пер. с англ. М.: Техносфера, 2010. 556 с.

Simulation model of convert aviation hyperspectral data to satellite sensors

V.N. Ostrikov, O.V. Plakhotnikov, K.M. Shulika

*Joint-Stock Company «Luch»,
197376 Saint-Petersburg, Akademika Pavlova str, 14a
E-mail: luchspb@rambler.ru*

The paper describes simulation model for convert the aviation hyperspectral data to satellite sensors. The pretreatment of aviation hyperspectral images discussed. Properties of system were developed with a help of model MODTRAN 5.2 for hyperspectral data which were passed the optical atmosphere media to cosmos.

Keywords: pretreatment, hyperspectral data, simulation models.