

УДК 004.932

ПОВЫШЕНИЕ ИНФОРМАТИВНОСТИ МАТЕРИАЛОВ СЪЕМКИ ЗЕМЛИ ЗА СЧЕТ ОБЪЕДИНЕНИЯ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ С ДАННЫМИ ОТ ДРУГИХ СЪЕМОЧНЫХ СИСТЕМ

Еремеев В.В., директор НИИ «Фотон» РГРТУ, д.т.н., e-mail: foton@rsreu.ru

Макаренков А.А., аспирант НИИ «Фотон» РГРТУ

Москвитин А.Э., к.т.н., в.н.с. НИИ «Фотон» РГРТУ,

Мятов Г.Н., к.т.н., заместитель начальника Центра информационных технологий ДЗЗ ФГУП «ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс»

Ключевые слова: гиперспектральные изображения, комплексирование, спектральная характеристика, атмосферные искажения, меры сходства.

Введение

Гиперспектральная съемка – это новое перспективное направление дистанционного зондирования Земли. В ее основе лежит принцип расщепления отраженной от поверхности Земли лучистой энергии на десятки и сотни потоков, каждый из которых соответствует очень узкому спектральному диапазону, а в целом, регистрируется серия изображений в узких соприкасающихся диапазонах. В результате, формируется так называемый гиперкуб $B = \{B_{kmn}, m = \overline{1, M}, n = \overline{1, N}, k = \overline{1, K}\}$, где (m, n) – целочисленные координаты точки гиперспектрального изображения (ГСИ), k – номер спектрального диапазона (канала), B_{kmn} – яркость точки (m, n) в k -м канале. При $m = const, n = const : B_{kmn}, k = \overline{1, K}$ – есть спектральная характеристика в точке (m, n) в виде набора K значений энергетической яркости в различных спектральных диапазонах. Знание спектральной характеристики (СХ) в каждой точке гиперкуба позволяет на принципиально новой основе решать задачу сегментации и классификации объектов наблюдаемой сцены, поскольку СХ несет информацию об их физико-химических свойствах. Другой важной задачей, которая может решаться по данным ГСИ, является повышение информативности материалов космической съемки и улучшение их изобразительных свойств, так как ГСИ содержит полную информацию о распределении лучистой энергии по длине волны. Эта задача рассматривается в настоящей статье.

В тоже время процесс расщепления лучистой энергии порождает две проблемы. Во-первых, с ростом K пропорционально понижается отношение сигнала к шуму, что требует учета этого факта при проектировании алгоритмов обработки ГСИ. Во-вторых, СХ зарегистрированного изображения определяется не только спектральным составом излучения от поверхности Земли, но в значительной степени искажающим действием атмосферы. Поэтому это явление требует строгого учета при обработке и анализе искаженного атмосферой ГСИ.

Рассматриваются вопросы комплексирования гиперспектральных данных: объединение спектральных каналов гиперспектральных изображений, их комплексирование с данными от других съемочных систем. Цель такой операции – это повышение информативности материалов съемки и упрощение интерпретации данных дистанционного зондирования Земли. Представлены результаты обработки натурной гиперспектральной информации.

За рубежом в последнее десятилетие активно ведутся работы по использованию ГСИ в различных областях применения данных ДЗЗ [1-5]. Публикации в этом направлении составили основу для написания настоящей статьи. В тоже время в зарубежной и отечественной печати отмечается, что эти работы находятся в начальной стадии и требуют своего развития.

Задачи комплексирования ГСИ

Можно сформулировать три задачи комплексирования ГСИ.

1-я задача. На основе ГСИ, в котором в различных спектральных каналах объекты сцены отображаются совершенно по-разному, сформировать одно или несколько новых изображений, так чтобы все объекты наблюдаемой сцены представились бы с более высокой четкостью.

2-я задача. На основе ГСИ, спектральные характеристики которого существенно искажены атмосферой, сформировать RGB-компоненты, «очищенные» от этих искажений, и на этой основе сформировать цветное изображение в естественных цветах.

3-я задача. Комплексирование ГСИ с данными высокодетальной съемки от других съемочных систем с целью повышения пространственного разрешения ГСИ и представления изображений в форме, привычной для человеческого зрения.

При решении этих задач возникает необходимость сопоставления спектральных характеристик различных точек ГСИ или СХ реально наблюдаемых объектов с некоторыми эталонными СХ, взятыми из специально созданной базы. Такое сопоставление может быть выполнено с использованием различных мер сходства. В работе [6] исследованы три меры близости СХ – среднеквадратическая, корреляционная и спектрально-угловая. С применением натурной ГСИ установлено, что корреляционная мера дает более качественные результаты. Она определяется как

$$\rho_{mn} = \frac{\overline{B_{mn} \cdot B_{m+1,n}} - \overline{B_{mn}} \cdot \overline{B_{m+1,n}}}{\sigma_{mn} \cdot \sigma_{m+1,n}}, \quad (1)$$

где σ_{mn} и $\sigma_{m+1,n}$ – среднеквадратические отклонения отсчетов спектральных характеристик для точек (m, n) и $(m+1, n)$, а черта над переменными и выражениями означает операцию усреднения по K спектральным диапазонам.

Достоинством меры (1) является ее инвариантность к линейным искажениям сопоставляемых СХ и малая зависимость от действия аддитивного некоррелированного шума, характерного для гиперспектральной съемки. Поэтому далее будем использовать меру (1).

Влияние шума на оценку корреляции спектральных характеристик

Расщепление полезного видеосигнала на десятки и сотни составляющих при формировании ГСИ приводит к многократному сокращению отношения сигнал/шум. Относительное повышение уровня шума ε приводит к искажению оценки $\rho \rightarrow \rho_\varepsilon$. Есть ряд веских оснований считать этот шум в различных каналах гиперкуба одинаково распределенным, с нулевым средним, аддитивным и независимым по отношению к полезному сигналу. В этом случае мера близости двух точек определится как

$$\rho_\varepsilon = \frac{(\overline{B_1 + \varepsilon_1})(\overline{B_2 + \varepsilon_2}) - \overline{B_1 + \varepsilon_1} \cdot \overline{B_2 + \varepsilon_2}}{\sqrt{(D_1 + D_\varepsilon)(D_2 + D_\varepsilon)}}, \quad (2)$$

где B_1, B_2 – спектральные характеристики сравниваемых точек; D_1, D_2 и D_ε – дисперсии яркости изображений B_1, B_2 и шума. С учетом, что $\overline{\varepsilon_1} = \overline{\varepsilon_2} = 0$, $\overline{D_{\varepsilon 1}} = \overline{D_{\varepsilon 2}} = D_\varepsilon$,

$$\rho_\varepsilon = \frac{\overline{B_1 B_2} - \overline{B_1} \cdot \overline{B_2}}{\sqrt{D_1 D_2 + D_\varepsilon (D_1 + D_2) + D_\varepsilon^2}}. \quad (3)$$

При одинаковых СХ в рассматриваемых точках $B_1 = B_2 = B$, $D_1 = D_2 = D$ и

$$\rho_\varepsilon = \frac{\overline{B^2} - (\overline{B})^2}{D + D_\varepsilon} = \rho \cdot \frac{1}{1 + D_\varepsilon/D}, \quad (4)$$

т.е. шум уменьшает оценку ρ , а степень уменьшения определяется отношением D_ε/D . Особенно сильно это явление проявляется на монотонно изменяющихся участках СХ, где D мало. Аналогичный вывод следует и из выражения (3). Ошибка вычисления корреляции по формуле (2), вызванная шумом, может быть в значительной степени устранена путем оценки D_ε по ГСИ с использованием методики, изложенной в работе [7], и вычитания из дисперсий сравниваемых СХ величины D_ε .

Коррекция атмосферных искажений

Излучение, перед тем как попасть на гиперспектрометр, дважды проходит через слои атмосферы: на пути от Солнца до поверхности Земли и на пути от Земли до

датчика. Передаточная характеристика атмосферы имеет сравнительно динамичный вид, что приводит к существенным нелинейным искажениям СХ, регистрируемых ГСИ.

Известны два подхода к коррекции атмосферных искажений. Первый подход основан на применении многопараметрических аналитических моделей [8], требующих знания большого числа физических параметров, получение которых на момент гиперспектральной съемки является очень сложной задачей. Второй подход основан на статистической обработке ГСИ. В общем виде атмосферные искажения можно представить как

$$B_{mnk} = \alpha_{mnk} B_{mnk}^* + \beta_{mnk}, \quad (5)$$

где α_{mnk} – составляющая искажений, характеризующая поглощение энергии в атмосфере; β_{mnk} – составляющая, описывающая энергию, отраженную от слоев атмосферы и не дошедшую до поверхности Земли; B_{mnk}^* – яркость без атмосферных искажений.

При регистрации ГСИ все точки, относящиеся к отдельному столбцу или группе близлежащих столбцов, находятся в равных условиях с точки зрения атмосферных искажений. Поэтому при $k = const$ и $n = const$: $B_{mk} = \alpha_{mk} B_{mk}^* + \beta_{mk}$, где $\alpha_{mk} = const$, $\beta_{mk} = const$. С учетом этого и выражения (5)

$$B_{mnk}^* = (B_{mnk} - \overline{B_{mk}}) \frac{\sigma}{\sigma_{mk}} + \overline{B}, \quad (6)$$

где $\overline{B_{mk}}$ и σ_{mk} – средняя яркость и СКО m -го столбца в k -м канале, \overline{B} и σ – средняя яркость и СКО по всему гиперкубу. Атмосферная коррекция на основе (6) вносит искажения в СХ объектов, т.к. $\overline{B_{mk}}$ и σ_{mk} характеризует не только искажающее действие атмосферы, но и изменение распределения яркости для различных столбцов изображения.

Как правило, гиперспектральная съемка выполняется в достаточно узкой полосе обзора, так что зависимостью α_{mnk} и β_{mnk} от m, n можно пренебречь, т.е. считать $\alpha_{mnk} = \alpha_k$ и $\beta_{mnk} = \beta_k$, $m = \overline{1, M}$, $n = \overline{1, N}$. В этом случае $B_{mnk}^* = (B_{mnk} - \overline{B})/\sigma$ и искажения яркости в пределах каждого спектрального канала отсутствуют.

Учитывая, что передаточная характеристика атмосферы в целом имеет плавный характер (за исключением областей пикового поглощения энергии), ее можно представить в кусочно-линейной форме:

$$B_{mnk} = \alpha_w B_{mnk}^* + \beta_w, \quad w = \overline{1, W}.$$

где α_w, β_w – коэффициенты, описывающие атмосферные искажения на w -м интервале длин волн. На w -м интервале $\alpha_w = const$, $\beta_w = const$ и мера ρ_w , вычисленная по (1), не зависит от численных значений α_w и β_w . Поскольку задача состоит в оценке ρ , инвариантной к действию атмосферы во всем диапазоне длин

волн, то логично определить ρ как $\rho = \frac{1}{W} \sum_{w=1}^W \rho_w$. Со-

кращение объема выборки в результате разбиения всего диапазона длин волн на несколько интервалов приводит к ошибкам в оценке коэффициента корреляции. Однако, в результате усреднения ρ_w на интервалах $w = \overline{1, W}$, эта ошибка уменьшается.

Сравнение результатов атмосферной коррекции по аналитической модели и рассмотренных выше статистических подходов показала адекватность последних. Дополнительным косвенным свидетельством корректности статистических подходов является устранение искажений в областях пикового поглощения излучения атмосферой.

Получение изображений в естественных цветах

Для решения этой задачи необходимо устранить на ГСИ атмосферные искажения и с учетом спектральной чувствительности человеческого зрения осуществить соответствующее объединение спектральных каналов. С учетом этого RGB-компоненты r_{mn} , g_{mn} , b_{mn} после коррекции атмосферы определяются как

$$r_{mn} = \sum_{k=k_{r1}}^{k_{r2}} B_{kmn}^* \phi_r(k), \quad g_{mn} = \sum_{k=k_{g1}}^{k_{g2}} B_{kmn}^* \phi_g(k),$$

$$b_{mn} = \sum_{k=k_{b1}}^{k_{b2}} B_{kmn}^* \phi_b(k),$$

где $\phi_r(k)$, $\phi_g(k)$, $\phi_b(k)$ – функции пересчета спектральной характеристики в компоненты RGB с учетом спектральной чувствительности глаза [9]; k_{r1} , k_{g1} , k_{b1} и k_{r2} , k_{g2} , k_{b2} – левые и правые границы спектральных диапазонов, соответствующих компонентам RGB.

На рис. 1 представлены два изображения – сформированное на основе 3-х каналов исходного ГСИ (слева) и в естественных цветах после коррекции атмосферных



искажений и учета спектральной чувствительности человеческого зрения (справа).

Комплексирование ГСИ с данными от других съемочных систем

Цель решения этой задачи состоит в том, чтобы на основе данных от различных съемочных систем (многозональных, гиперспектральных, тепловых, радиолокационных) сформировать новые изображения, которые бы отличались более высокими изобразительными свойствами, т.е. были бы представлены в привычной для человеческого зрения форме.

В ряде работ [2, 3] предложены алгоритмы поточечного совмещения разнородных данных ДЗЗ, основанные на учете локальных статистических свойств объединяемых изображений: LMM (Local Mean Matching), LMVM (Local Mean Variance Matching) и др.

Например, согласно алгоритму LMM значение элемента R_{kmn} результирующего изображения определяется как [2, 3]

$$R_{kmn} = A_{kmn} \frac{B_{kmn}^o}{A_{kmn}^o},$$

где A_{kmn} и B_{kmn} – объединяемые изображения, A_{kmn}^o и B_{kmn}^o – средние яркости элементов в некотором прямоугольном «окне» с центром (m, n) . В алгоритме LMVM [2, 3]:

$$R_{kmn} = \left(A_{kmn} - \overline{A_{kmn}^o} \right) \frac{\sigma_{B_{kmn}^o}}{2\sigma_{A_{kmn}^o}} + B_{kmn},$$

где $\sigma_{A_{kmn}^o}$ и $\sigma_{B_{kmn}^o}$ – СКО яркости, рассчитанные в «окне» с центром (m, n) .

Результат комплексирования по алгоритму LMVM видимой информации (КА Spot-5) (изображение слева) с радиолокационным снимком (TerraSAR-X) (снимок в центре) представлен на рис. 2 (изображение справа).



Рис. 1. Изображение в естественных цветах сформированное на основе ГСИ

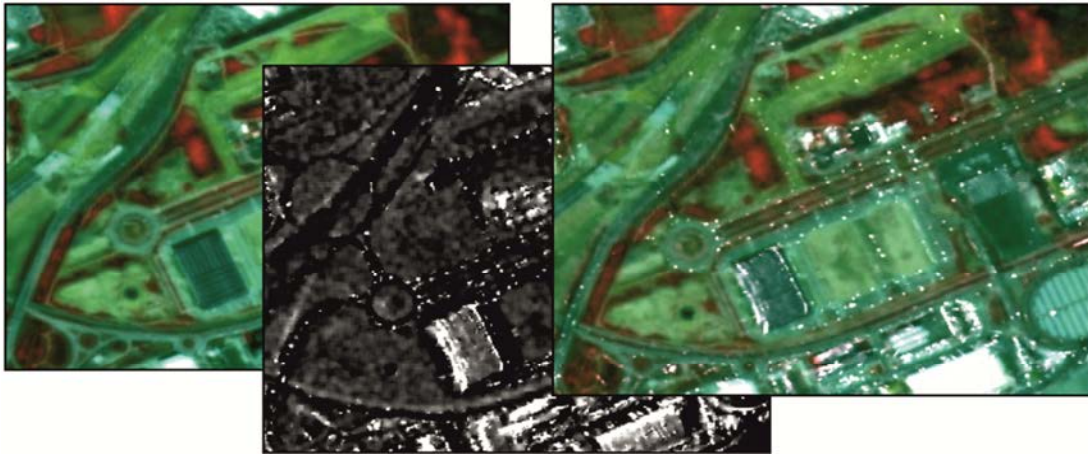


Рис. 2. Комплексование видимой и радиолокационной информации

Комплексование ГСИ с данными высокого пространственного разрешения

Эта задача состоит в том, чтобы объединить ГСИ, имеющее высокое спектральное, но, как правило, низкое пространственное разрешение, с данными высокого пространственного разрешения. Возможны два подхода к решению этой задачи. Первый подход основан на модуляции ГСИ высокодетальными видеоданными. В этом случае ГСИ определяется в более частой решетке пространственной дискретизации путем интерполяции частотной характеристики и затем выполняется комплексование с данными высокодетальной съемки. Второй подход основан на спектральном разделении элементов ГСИ с целью определения СХ для более мелких пространственных составляющих.

1-й подход. Пусть для некоторого участка земной поверхности синхронно получены ГСИ $B \in \{B_{kmn}, k = \overline{1, K}\}$ и спектральнональное изображение $D \in \{D_{prs}, p = \overline{1, P}\}$, при этом периоды повторения узлов (m, n) и (r, s) значительно отличаются, т.е. $R/M \gg 1, S/N \gg 1$. Результирующее изображение B_{krs}^* определяется путем модуляции B и D :

$$B_{krs}^* = \frac{D_{prs} \cdot B_{krs}}{D_p \cdot B_k} \cdot \bar{B}_k, \quad p = 1 + \text{ent} \left(k \frac{P}{K} \right), \quad (7)$$

$$\text{где } \overline{D_p B_k} = \frac{1}{RS} \sum_{r=1}^R \sum_{s=1}^S D_{prs} B_{krs},$$

$$\bar{B}_k = \frac{1}{MN} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N B_{kmn}, \quad B_{krs} = \Phi(B_{kmn}) - k\text{-я компонента ГСИ, восстановленная в узлах частой решетки}$$

(r, s) оператором Φ .

2-й подход. Каждая точка ГСИ B – есть объединение некоторого множества базовых спектральных характеристик S , взятых в более частой решетке дискретизации, соответствующей высокодетальному снимку. Этот процесс может быть описан линейной моделью [4]:

$$B = \sum_{i=1}^I S_i \gamma_i, \quad \text{где } S = \{S_i, i = \overline{1, I}\}, \quad I - \text{число базовых}$$

СХ в рассматриваемой площадке, соответствующей одному пикселю ГСИ, γ_i – весовые коэффициенты. Задача спектрального разделения состоит в получении S для каждой точки ГСИ B . Предлагается параметры S и γ_i оценивать с привлечением данных высокодетальной съемки. Пусть на ГСИ имеются точки, в которых представлен только один объект, а не смесь. Этим точкам соответствуют СХ $S_j \in S^*, j = \overline{1, J}$, где S^* – множество спектральных характеристик базовых объектов ГСИ. Тогда задача сводится к нахождению для каждой точки ГСИ такого подмножества $S \in S^*$ и весов γ_i , смесь которых наиболее близка была бы к B . Поиск S^* осуществляется путем анализа СКО яркостей высокодетального снимка для площадок, соответствующих каждой точке ГСИ. К $S_j \in S^*$ первоначально относятся все точки ГСИ, соответствующие областям высокодетального снимка с низкой СКО яркости. Полученное множество спектров вероятнее всего будет содержать характеристики одних и тех же объектов, представленных в разных точках ГСИ. Для формирования множества СХ базовых объектов выполняется отсеивание спектральных характеристик с высоким коэффициентом корреляции. Веса γ_i определяются как отношение площадей областей с близкой яркостью к числу элементов высокодетального снимка, соответствующих каждому пикселю ГСИ.

В качестве примера на рис. 3 представлен результат комплексования по 1-му способу: слева – ГСИ с низким пространственным разрешением; в центре – спектральнональный снимок высокого разрешения; справа – результирующее ГСИ.

Заключение

Рассмотренные выше алгоритмы апробированы на натурной информации от различных отечественных и зарубежных систем наблюдения Земли: Ресурс-П, EarthObserver-01, AVIRIS, TerraSAR-X, SPOT-5 и др. Качество решения задачи комплексования разнородной информации в рассмотренных выше постановках оценивалось по методикам, изложенным в работах [5, 10]. В качестве меры эффективности комплексования изоб-

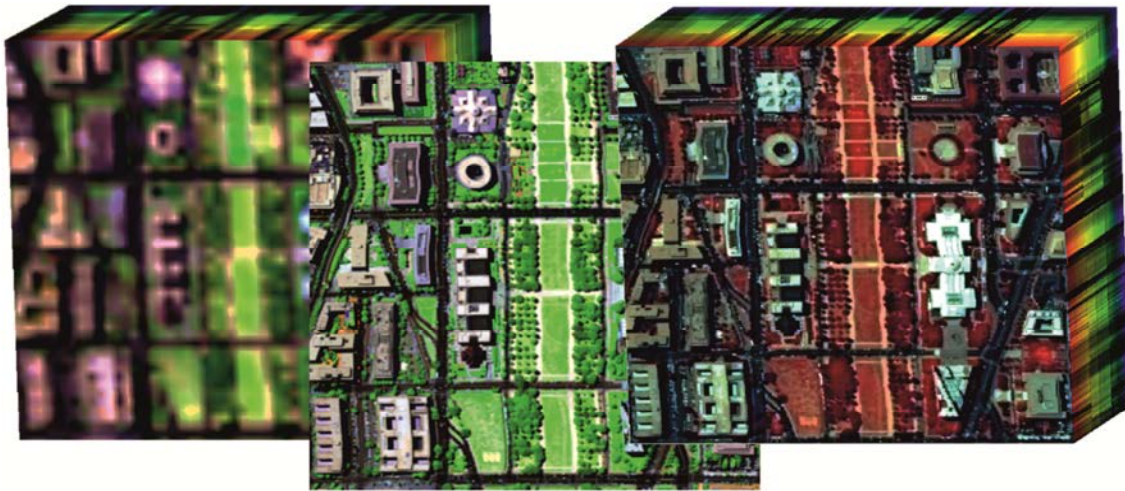


Рис. 3. Комплексование ГСИ с данными высокого пространственного разрешения

ражений A и B использовалась степень улучшения градиента Q :

$$Q = \frac{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N (\omega_{A_{mn}} Q_{A_{mn}} + \omega_{B_{mn}} Q_{B_{mn}})}{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N (\omega_{A_{mn}} + \omega_{B_{mn}})}, \quad (8)$$

где $\omega_{A_{mn}}$ и $\omega_{B_{mn}}$ – информативность элемента (m, n) на изображениях A и B , $Q_{A_{mn}}$ и $Q_{B_{mn}}$ – нелинейные функции, зависящие от разности направлений и модулей градиентов исходных и результирующего изображений. Развернутые выражения для этих функций представлены в работах [5, 10]. В целом результаты экспериментов подтвердили высокую эффективность предложенных алгоритмов.

Настоящая работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант ОФИ-М-2013 № 13-01-12014).

Литература

1. Yuhas, R.H., Goetz, A.F.H., and Boardman, J.W., 1992, Discrimination among semiarid landscape endmembers using the spectral angle mapper (SAM) algorithm. In Summaries of the Third Annual JPL Airborne Geoscience Workshop, JPL Publication 92-14, vol. 1, pp. 147-149.
2. De Béthune S., F.Muller, and J. P. Donnay, 1998. «Fusion of multispectral and panchromatic images by local mean and variance matching filtering techniques». In: Proceedings of The Second International Conference: Fusion of Earth Data: Merging Point Measurements, Raster Maps and Remotely Sensed Images, Sophia-Antopolis, France, 1998, pp. 31–36.
3. De Béthune. S., F. Muller, and M. Binard, 1997. «Adaptive Intensity Matching Filters: Anew Tool for Multi – Resolution Data Fusion». Proceedings of Multi-Sensor Systems and Data Fusion for Telecommunications, Remote Sensing and Radar, Lisbon, Sept.oct. 1997, RTO-NATO organization.
4. Keshava N. «A survey of spectral unmixing algorithms». Lincoln Laboratory Journal 14 №1 2003, pp. 55-78.

5. Costas Xydeas, Vladimir Petrovic. Pixel-level image fusion metrics. Image fusion: algorithms and applications. – Great Britain: Academic Press, 2008. pp 429-450.

6. Антонушкина С.В., Еремеев В.В., Макаренков А.А., Москвитин А.Э. Особенности анализа и обработки информации от систем гиперспектральной съемки земной поверхности // Цифровая обработка сигналов. 2010. №4. С. 38-43.

7. Еремеев В.В., Князков П.А., Козлов Е.П., Москвитин А.Э. Технологии анализа и оценки качества космических изображений // Цифровая обработка сигналов. 2010. №3. С. 37-43.

8. Mahiny, A. S., and Turner, B. J., 2007. A comparison of four common atmospheric correction methods. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 73, pp. 361-368.

9. www.cie.co.at.

10. Еремеев В.В., Макаренков А.А., Москвитин А.Э., Юдаков А.А. Повышение четкости отображения объектов на данных гиперспектральной съемки земной поверхности // Цифровая обработка сигналов. 2012. №3. С. 35-39.

INCREASE OF IMAGERY OF EARTH SURVEY DATA INFORMATIVITY BY FUSION OF HYPERSPETRAL INFORMATION WITH DATA FROM DIFFERENT IMAGING SYSTEMS

*Eremeev V.V., Makarenkov A.A.,
Moskvitin A.E., Myatov G.N.*

Different approaches to fusion of hyperspectral data were discussed in the article. In the article fusion approaches were divided and discussed according to three groups: 1. Fusion of hyperspectral channels in order to form a new panchromatic or multispectral imagery on which all objects presented in different hyperspectral channels were preserved with same recognizability; 2. Synthesis of hyperspectral imagery in natural color representation; 3. Fusion of hyperspectral data with high resolution imagery in order to increase ground resolution of data. Influence on hyperspectral data processing (with example of calculation of spectral correlation) of such factors as signal noise and atmospheric distortion were discussed.