

ПОВЫШЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНОЙ СЪЕМКИ ЗЕМЛИ НА ОСНОВЕ ИХ КОМПЛЕКСИРОВАНИЯ С ВЫСОКОДЕТАЛЬНЫМИ СНИМКАМИ

Еремеев В.В., директор НИИ «Фотон» Рязанского государственного радиотехнического университета (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.

Ключевые слова: гиперспектральные изображения, комплексирование, спектральное разделение, многозональные изображения, повышение пространственного разрешения.

Введение

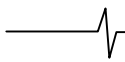
Спутниковые гиперспектральные снимки по сравнению с многозональными обладают существенно меньшим пространственным разрешением. Это накладывает ряд ограничений на области их применения. Часто проекция одного пикселя гиперспектрального изображения (ГСИ) на земной поверхности может содержать сотни пикселей, полученных многозональным датчиком более высокого пространственного разрешения [1, 2]. Так что гиперспектрометр регистрирует некоторую усредненную спектральную характеристику сравнительно большого участка Земли. Полученная в результате спектральная характеристика (СХ) описывает усредненные свойства всех СХ объектов, входящих в этот участок (так называемых спектральных составляющих), т.е. образуется «смешанная» СХ. При этом уменьшение проекции пикселя не приводит к отсутствию эффекта «смешивания» спектральных характеристик, т.к. часто объекты характеризуются смесью на уровне частиц (например, почва с минеральными примесями). В тоже время при тематической обработке гиперспектральных изображений требуется знание спектра отдельных более малых объектов, а не смеси их спектральных характеристик.

В ряде работ [3-5] рассматривается задача спектрального разделения, т.е. получения спектров отдельных объектов, составляющих пиксель гиперспектрального изображения, на основе статистической обработки самих данных. Так, в работе [3] предлагается применение метода главных компонент для определения состава и процентных долей смешанных пикселей ГСИ. В работе [5] предлагается подход, основанный на использовании линейной регрессии для поиска составляющих смешанной СХ при известном наборе эталонных («чистых») спектральных характеристик. Эти подходы для решения задачи спектрального разделения, т.е. получения спектров отдельных объектов, составляющих пиксель гиперспектрального изображения, основаны на статистической обработке самих гиперспектральных данных. Недостатком этих подходов является необходимость применения библиотек спектральных характеристик, что требует высокоточной взаим-

Рассматриваются вопросы повышения пространственного разрешения гиперспектральных данных. Предлагается новый подход к решению этой задачи с использованием алгоритма спектрального разделения пикселей гиперспектрального изображения. Спектральное разделение предлагается выполнять с привлечением материалов синхронной многозональной высокодетальной съемки. Представлены результаты обработки натурной гиперспектральной информации.

ной калибровки видеоданных и СХ из библиотек. Другой недостаток обусловлен сложностью точного определения процентных долей примесей в пикселе. В тоже время этот процесс может быть выполнен на более качественном уровне с использованием данных синхронной гиперспектральной и высокодетальной съемки [6-9]. В этом случае в качестве опорной информации при спектральном разделении ГСИ привлекаются материалы синхронной многозональной съемки с многократно большим пространственным разрешением по сравнению с ГСИ. То есть для анализа каждого пикселя ГСИ, которому соответствует некоторая апертура, привлекаются десятки и сотни элементов высокодетального многозонального изображения, попавших в эту апертуру. Если в упомянутых выше работах используются идеи технологии *pan-sharpening* [1, 2, 6-9], а также технологии спектрального разделения на основе привлечения спектральных библиотек [3-5], то ниже рассматривается иной подход к решению задачи повышения пространственного разрешения гиперспектральных изображений. Он основан на применении идей спектрального разделения ГСИ с привлечением высокодетальных снимков.

Пусть имеется ГСИ $B = \{B_{mnk} \mid m = \overline{1, M}, n = \overline{1, N}, k = \overline{1, K}\}$, где m, n – номера строк и столбцов элементов изображения, k – номер спектрального канала. Будем считать, что синхронно с ГСИ получен многозональный снимок высокого разрешения $D = \{D_{rsp} \mid r = \overline{1, R}, s = \overline{1, S}, p = \overline{1, P}\}$, r, s – номера строк и столбцов элементов изображения, p – номер спектрального канала. При этом одному элементу ГСИ B_{mn} соответствует область (апертура) \hat{D}_{mnp} на снимке D : $\hat{D}_{mnp} = \{D_{rsp} \mid r = \overline{r_1, r_2}, s = \overline{s_1, s_2}, p = \overline{1, P}\}$, $r_1 = m\omega$, $r_2 = (m+1)\omega$, $s_1 = n\omega$, $s_2 = (n+1)\omega$, где ω – отношение пространственных разрешений сним-



ков B и D , т.е. $R = \omega M$. При $m = const$ и $n = const$: $B_{mn} = (B_{mnk}, k = \overline{1, K})$ – вектор значений энергетических яркостей, образующих спектральную характеристику точки (m, n) гиперспектрального изображения. При $r = const$ и $s = const$: $D_{rs} = (D_{rsp}, p = \overline{1, P})$ – вектор значений спектральной характеристики для точки (r, s) многозонального изображения, при этом $K \gg P$. Каждому каналу k гиперспектрального изображения соответствует вполне определенный спектральный диапазон $\lambda_k = [\lambda_{k1}, \lambda_{k2}]$, где λ_{k1} и λ_{k2} – левая и правая граница спектрального диапазона с центром $\bar{\lambda}_k$. Аналогично определим для многозонального изображения: $\lambda_p = [\lambda_{p1}, \lambda_{p2}]$ и центр $\bar{\lambda}_p$. Введем дискретную функцию $h(\lambda)$, ставящую в соответствие произвольной длине волны λ канал гиперспектрального изображения $k = h(\lambda)$ такой, что $\lambda \in [\lambda_{k1}, \lambda_{k2}]$. Определим функцию сравнения спектральных характеристик многозонального и гиперспектрального изображений как $\Phi(B_{mn}, D_{rs})$. При этом $\Phi(B_{m1n1}, D_{r1s1}) > \Phi(B_{m2n2}, D_{r2s2})$, если точки (m_1, n_1) и (r_1, s_1) соответствуют однотипному сюжету подстилающей поверхности, а точки (m_2, n_2) и (r_2, s_2) – различающемуся. Если $\Phi(B_{m1n1}, D_{r1s1}) \geq \tilde{\Phi}$, то будем считать, что точки (m_1, n_1) и (r_1, s_1) принадлежат одному и тому же объекту. В данном случае под $\tilde{\Phi}$ понимается минимальное значение функции $\Phi(B_{m1n1}, D_{r1s1})$.

Субпиксельное спектральное разделение ГСИ

Для каждой точки гиперспектрального изображения B определяются спектральные характеристики входящих в ее апертуру объектов и их процентные доли по площади. В результате формируется новое ГСИ B' с пространственным разрешением исходного гиперспектрального снимка B . При этом каждой точке B' приписывается несколько спектральных характеристик (по числу объектов, входящих в пиксель изображения B). Каждая спектральная характеристика сопровождается весовым коэффициентом, характеризующим относительную площадь объекта внутри точки.

Конкретно алгоритм реализуется в виде последовательного выполнения следующих шагов.

Шаг 1. Формируется новое ГСИ $\bar{B} = \{\bar{B}_{mnp} \mid m = \overline{1, M}, n = \overline{1, N}, p = \overline{1, P}\}$, путем приведения B к спектральным диапазонам высокодетального изображения D . Эта процедура выполняется путем интегрирования значений спектральной характеристики ГСИ B в диапазонах длин волн, соответствующих многозональному изображению D :

$$\bar{B}_{mnp} = \sum_{\lambda=\lambda_{p1}}^{\lambda_{p2}} \delta_p(\lambda) B_{mnh(\lambda)},$$

где $\delta_p(\lambda)$ – передаточная характеристика канала p изображения D .

В результате формируется новое многозональное изображение \bar{B} с тем же числом каналов P , что и изображение D , и определенное в той же редкой решетке, что и гиперспектральный снимок B .

Шаг 2. Для каждого пикселя $\bar{B}_{mn} = (\bar{B}_{mnp}, p = \overline{1, P})$ анализируются соответствующие пиксели изображения D , входящие в апертуру $\hat{D}_{mn} = \{D_{rsp} \mid r = \overline{r_1, r_2}, s = \overline{s_1, s_2}, p = \overline{1, P}\}$. Если $\Phi(\bar{B}_{mn}, D_{rs}) \geq \tilde{\Phi}$ для всех $r = \overline{r_1, r_2}$ и $s = \overline{s_1, s_2}$, т.е. все пиксели изображения D , входящие в апертуру \hat{D}_{mn} , схожи с пикселем \bar{B}_{mn} , то пиксель B_{mn} считается «чистым» (т.е. включающим один вполне определенный объект), а соответствующая ему СХ в виде вектора: $B_{mn} = (B_{mnk}, k = \overline{1, K})$ заносится в список опорных спектральных характеристик $S = \{S_i \mid i = \overline{1, I}\}$, где $S_i = (S_{ik}, k = \overline{1, K})$, $S_{ik} = B_{mnk}$.

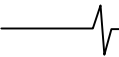
Шаг 3. В списке S удаляются все дублирующиеся спектральные характеристики, т.е. S_i удаляется, если $\min_{j=1, I, j \neq i} \Phi(S_i, S_j) \geq \tilde{\Phi}$. В результате формируется список уникальных опорных спектральных характеристик $S^* = \{S_i^* \mid i = \overline{1, I^*}\}$.

Шаг 4. Спектральные характеристики S_i^* из списка S^* приводятся к спектральному разрешению многозонального изображения D :

$$\bar{S}_i^* = (\bar{S}_{ip}^*, p = \overline{1, P}), \bar{S}_{ip}^* = \sum_{\lambda=\lambda_{p1}}^{\lambda_{p2}} \delta_p(\lambda) S_{ih(\lambda)}^*, i = \overline{1, I^*}.$$

В результате формируется список $\bar{S}^* = \{\bar{S}_i^* \mid i = \overline{1, I^*}\}$.

Шаг 5. Для каждого пикселя \bar{B}_{mn} изображения \bar{B} анализируются пиксели в апертуре $\hat{D}_{mn} = \{D_{rsp} \mid r = \overline{r_1, r_2}, s = \overline{s_1, s_2}, p = \overline{1, P}\}$. Для этого $D_{rs} = (D_{rsp}, p = \overline{1, P})$ сопоставляется с опорными спектрами \bar{S}_i^* , $i = \overline{1, I^*}$. В результате для каждой точки (r, s) , $r = \overline{r_1, r_2}$, $s = \overline{s_1, s_2}$, находится наиболее близкий опорный спектр \bar{S}_l^* как $l = \arg \max_i \Phi(\bar{S}_i^*, D_{rs})$, а также количество точек T_i в апертуре, для которых найденный спектр является наиболее близким. Процентные доли опорного спектра в апертуре вычисляются как $\tilde{T}_i = T_i / \omega$. Найденные опорные спектры и их процентные доли записываются соответственно в списки $QS_{mn} = \{S_i^* \mid i = \overline{1, \tilde{I}_{mn}}\}$ и $QT_{mn} = \{\tilde{T}_i \mid i = \overline{1, \tilde{I}_{mn}}\}$, где \tilde{I}_{mn} – количество различающихся опорных спектров, найденных в апертуре. Таким образом, для каждой точки (m, n) изображения B формируется списки QS_{mn} и QT_{mn} , состоящие из спектральных характеристик объектов, образующих «смесь», и их процентных долей в смеси так, что



для каждой точки (m, n) выполняется соотношение

$$B_{mn} = \sum_{i=1}^{\bar{i}} QT_{mni} (\alpha \cdot QS_{mni} + \beta),$$

где $\alpha = \{\alpha_k | k = \overline{1, K}\}$, $\beta = \{\beta_k | k = \overline{1, K}\}$ – коэффициенты преобразования опорных СХ, учитывающие различные условия получения опорной СХ, и СХ фактически анализируемой точки. Таким образом, каждой точке изображения B' ставится в соответствие несколько СХ, образующих эту точку, и их процентные доли в смеси.

Повышение пространственного разрешения ГСИ

В каждой точке высокодетального снимка восстанавливается спектральная характеристика. Тем самым формируется новое гиперспектральное изображение с пространственным разрешением высокодетального снимка.

Этот процесс включает следующие шаги.

Шаг 1. Выполняются шаги 1-4 алгоритма субпиксельного спектрального разделения ГСИ.

Шаг 2. Формируется новое изображение $D^* = \{ D_{rsk}^* | r = \overline{1, R}, s = \overline{1, S}, k = \overline{1, K} \}$ с пространственным разрешением изображения D и со спектральным разрешением изображения B . Спектр каждой точки в виде вектора $D_{rs} = (D_{rsp}, p = \overline{1, P})$ сопоставляется с опорными спектрами \overline{S}_i^* из списка \overline{S}^* . В результате сопоставления для произвольной фиксированной точки (r, s) находится наиболее близкий опорный спектр S_l^* , где $l = \arg \max_i \Phi(\overline{S}_i^*, D_{rs})$. После чего вектор D_{rs}^* заменяется на S_l^* . В результате в частой решетке, соответствующей многозональному изображению D , формируется гиперспектральное изображение D^* .

Шаг 3. Исходя из физического принципа съемки:

$$D_{rsp} = \sum_{\lambda=\lambda_{p1}}^{\lambda_{p2}} \delta_p(\lambda) D_{rsk(\lambda)}^*,$$

т.е. сумма элементов полученного спектра D_{rs}^* в диапазонах съемки многозонального изображения должна быть равна значению яркости в соответствующем пикселе D_{rs} . Однако из-за различных условий получения опорной СХ (на основе которой сформирован спектр точки D_{rs}^*) и фактически анализируемой точки (r, s) это равенство не выполняется. Для разрешения этой си-

туации рассчитываются мультипликативные коэффициенты коррекции γ_{rsk} , такие что:

$$D_{rsp} = \sum_{\lambda=\lambda_{p1}}^{\lambda_{p2}} \delta_p(\lambda) \gamma_{rsk(\lambda)} D_{rsk(\lambda)}^*,$$

где $\gamma_{rsk(\lambda)}$ – непрерывная функция от $k(\lambda)$, построенная путем линейной интерполяции P -точек:

$$\gamma_{rsp} = D_{rsp} / \overline{D}_{rsp}^*, \quad \overline{D}_{rsp}^* = \sum_{\lambda=\lambda_{p1}}^{\lambda_{p2}} \delta_p(\lambda) D_{rsk(\lambda)}^*, \quad p = \overline{1, P}.$$

Результирующее изображение D^{**} находится как

$D_{rsk}^{**} = \gamma_{rs}(k) D_{rsk}^*$. В результате в узлах частой решетки, соответствующей высокодетальному многозональному изображению D , формируется итоговое гиперспектральное изображение D^{**} , обладающее высокими и пространственным и спектральным разрешениями.

Эксперименты и выводы

Испытания рассмотренных алгоритмов выполнялись следующим образом (рис. 1). В качестве опорной информации использовался авиационный гиперспектральный снимок высокого пространственного разрешения B^* , состоящий из K -каналов. Этот снимок использовался в качестве эталонного. На основе него путем операции усреднения и прореживания в q раз строилось гиперспектральное изображение низкого пространственного разрешения B . Путем объединения спектральных каналов формировался многозональный снимок D , включающий L -диапазонов, где $L \ll K$. Изображение D обладало пространственным разрешением исходного изображения B^* с существенно меньшим спектральным разрешением. Выполнялось повышение пространственного разрешения изображения B на основе спектрального разделения (в качестве меры сходства Φ использовалась мера спектрального угла [10]). В результате формировалось изображение D^{**} . Качество работы алгоритма спектрального разделения оценивалось путем сопоставления СХ одноименных элементов изображений D^{**} и B^* . С использованием меры спектрального угла оценивалась ошибка спектрального разделения. За ошибочные принимались точки, для которых эта мера превышала 5 градусов. В результате на достаточно представительном статистическом материале (при $q=22$ и $L=4$) установлено, что доля ошибочных точек составила 4%, средняя величина этой ошибки по всем точкам составляет 1.3 градуса, а СКО – 1.7 градуса.

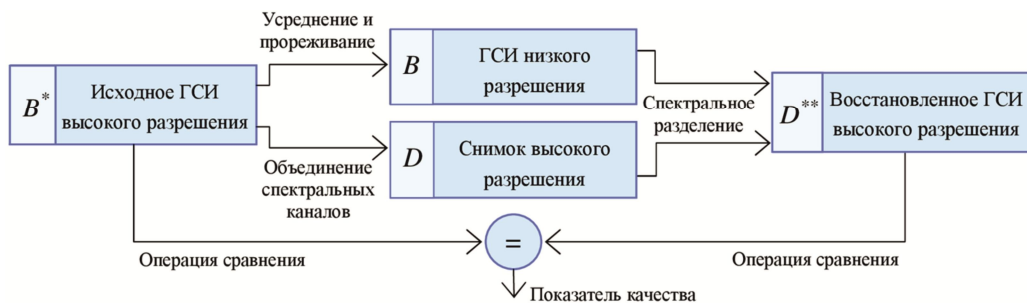


Рис. 1. Схема расчета показателя качества повышения разрешения ГСИ

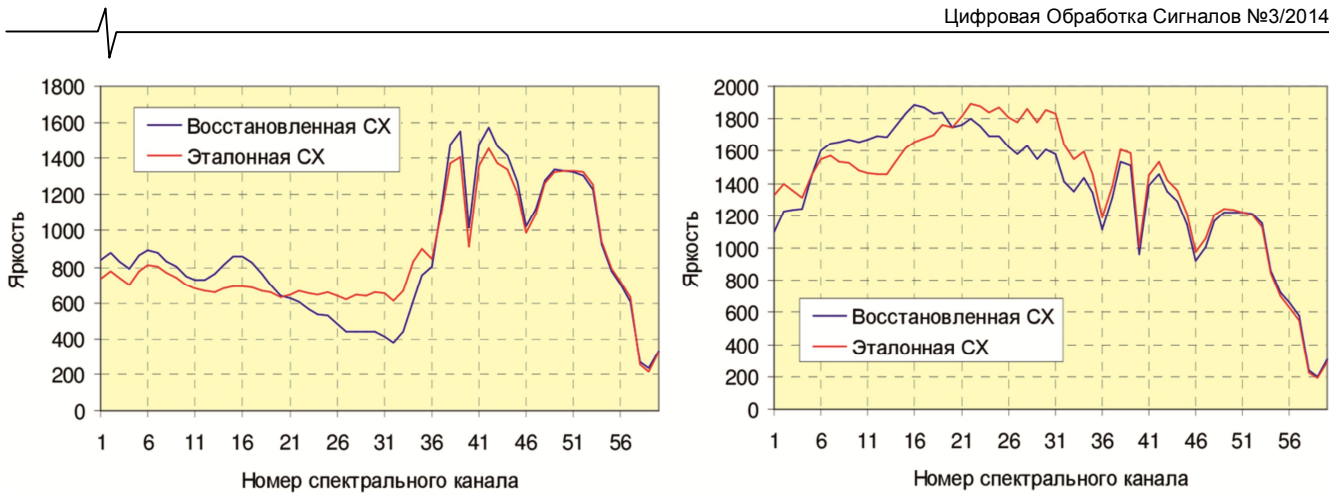


Рис. 2. Эталонная и восстановленная СХ

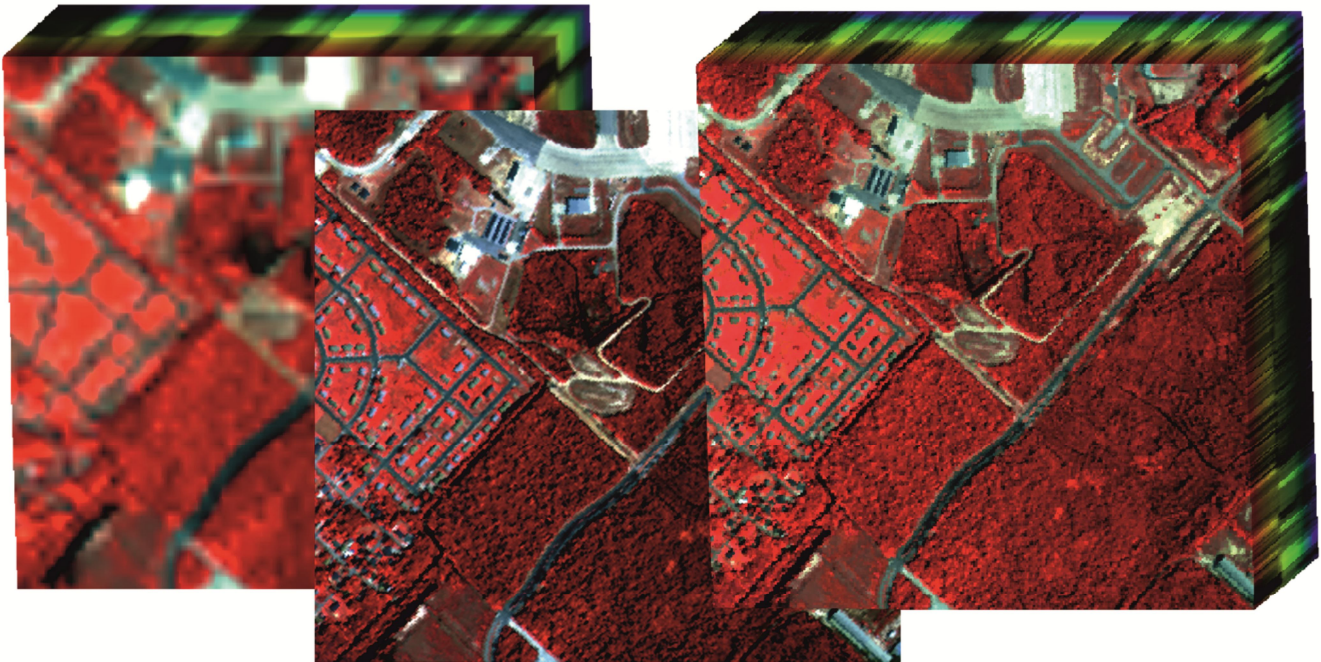


Рис. 3. Комплексование ГСИ с данными высокого пространственного разрешения

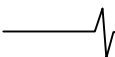
На рис. 2 слева приведены две СХ, построенные для вполне определенного объекта: красным цветом – для ГСИ высокого разрешения B^* , синим цветом – для восстановленного ГСИ D^{**} . На рис. 2 справа представлены аналогичные результаты для другого объекта. Как видим, восстановленные СХ достаточно близки к эталонным.

В качестве примера на рис. 3 представлен результат комплексования: слева – ГСИ с низким пространственным разрешением; в центре – многозональный снимок высокого пространственного разрешения; справа – результирующее ГСИ.

Таким образом, предложен подход к спектральному разделению гиперспектральных изображений с привлечением в качестве опорной информации высокдетальных многозональных снимков. Разработан алгоритм повышения пространственного разрешения гиперспектральных снимков, основанный на спектральном разделении пикселей ГСИ. Выполнена оценка качества алгоритма спектрального разделения и повышения пространственного разрешения ГСИ на основе натурной и модельной информации.

Литература

1. Еремеев В.В. «Современные направления работ по анализу и повышению качества космических изображений поверхности Земли» // Цифровая обработка сигналов. №1. 2012. С. 38 – 44.
2. Ахметов Р.Н., Стратилатов Н.Р., Юдаков А.А., Везенов В.И., Еремеев В.В. «Модели формирования и некоторые алгоритмы обработки гиперспектральных изображений» // Исследование Земли из космоса. №5. 2012. С. 17-28.
3. Lucas Parra, Clay Spence, Paul Sajda, Andreas Ziehe, Klaus-Robert Müller, «Unmixing Hyperspectral Data», in Advances in Neural Information Processing 12 (Proc. NIPS'99). 2000. PP. 942-948.
4. J.J. Settle, «Linear mixing and the estimation of end-members for the spectral decomposition of remotely sensed scenes», SPIE Remote Sensing for Geology, 2960. 1996. PP. 104-109.
5. Lordache, M.-D.; Bioucas-Dias, J.M.; Plaza, A., «Sparse Unmixing of Hyperspectral Data», Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on , vol.49, no.6. 2011. PP. 2014-2039.



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. №4. 2010. С. 38-43.

7. 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. №3. 2012. С. 35 – 40.

8. Еремеев В.В. «Современные проблемы обработки данных дистанционного зондирования Земли» // Радиотехника. №3. 2012. С. 54-64.

9. Еремеев В.В., Макаренков А.А., Москвитин А.Э., Мятлов Г.Н. «Повышение информативности материалов съемки Земли за счет объединения гиперспектральной информации с данными от других съемочных систем» // Цифровая обработка сигналов. №1. 2012. С. 38 – 44.

10. Yuhas, R.H., Goetz, A. F. H., and Boardman, J. W.,

«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. 1992. PP.147-149.

INCREASING OF SPATIAL RESOLUTION OF HYPERSPECTRAL IMAGERY OF EARTH BASED ON FUSION WITH HIGH RESOLUTION IMAGES

Eremeev V.V., Makarenkov A.A., Moskvitin A.E.

Increasing of spatial resolution of hyperspectral data were reviewed. A new approach to solving this problem is proposed. It is based on spectral unmixing algorithm. Spectral unmixing is done by incorporating of the synchronous high resolution multispectral survey data. Results of processing of the actual hyperspectral data were presented.

Журнал «Цифровая обработка сигналов»

покоряет вершины гор ...



Пик Курсанты



Эльбрус