

УДК 004.932

ВЫДЕЛЕНИЕ ГРАНИЦ ОБЪЕКТОВ НА ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫХ СПУТНИКОВЫХ СНИМКАХ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

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

Еремеев В.А., инженер НИИ «Фотон» РГРТУ, e-mail: foton@rsreu.ru

Макаренков А.А., с.н.с., к.т.н., НИИ «Фотон» РГРТУ

EDGE DETECTION OF OBJECTS ON HYPERSPECTRAL EARTH REMOTE SENSING IMAGERY

Eremeev V.V., Eremeev V.A., Makarenkov A.A.

The paper describes the problem of objects edges detection on hyperspectral Earth remote sensing images. The advantage of hyperspectral imagery relative to panchromatic data in the task of edge detection is proved. The impact of the electron noise on performance of edge detection is studied.

Key words: Earth remote sensing, hyperspectral images, objects edges detection, electron noise.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, гиперспектральные снимки, выделение границ объектов, электронный шум.

Введение

При обработке изображений важными проблемами были и остаются автоматическое выделение границ объектов наблюдаемой сцены [1]. Результаты такой операции находят применение в задачах оперативного совмещения изображений между собой или, например, с векторными картами. Также выделенные границы объектов позволяют существенно упростить трудно формализуемую задачу кластеризации изображения. Особенно востребовано качественное решение этой задачи при обработке данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). В последние годы появились средства гиперспектральной съемки Земли, которые позволяют одновременно получать десятки и сотни аэрокосмических изображений наблюдаемой сцены в очень узких соприкасающихся спектральных диапазонах – гиперспектральные изображения (ГСИ).

Выделение контуров на изображениях тесно связано с определением меры близости анализируемого элемента (на предмет его принадлежности к контуру) с ближайшими соседними элементами.

Гиперспектральная съемка позволяет каждому элементу изображения поставить в соответствие спектральную характеристику (СХ) – вектор значений яркости, полученных по данным от десятков и сотен спектральных каналов. Наличие такой детальной СХ для каждого элемента ГСИ позволяет более качественно решить задачу определения меры близости того или иного элемента по отношению к его окружению, так как спектральная характеристика отраженного от объекта излучения зависит от физических свойств этого объекта. В связи с этим выделение границ объектов на гиперспектральном снимке потенциально может дать лучшие результаты по сравнению с анализом границ объектов на панхроматических снимках [2, 3, 4]. Однако применение традиционных методов выделения границ на ГСИ

Рассматриваются вопросы выделения границ объектов на гиперспектральных снимках поверхности Земли. Обосновывается преимущество гиперспектральных изображений по отношению к панхроматическим в задаче выделения контуров объектов. Рассмотрены вопросы влияния электронного шума на эффективность процесса выделения границ.

затруднено, так как в отдельных спектральных каналах значительные искажения вносит шум. Уровень шума на ГСИ по отношению к полезному сигналу увеличивается в связи с многократным разделением сигнала в ходе прохождения через спектроделительное устройство гиперспектрометра. При этом пространственные меры сходства крайне чувствительны к влиянию шума, это связано с использованием в таких мерах операторов разности яркостей соседних элементов. В меньшей мере от шума зависят частотно-пространственные меры сходства, которые основаны на сопоставлении двух СХ, описывающих две сравниваемые точки гиперспектрального изображения. Далее будем использовать следующие обозначения: P – панхроматическое изображение (ПИ), а P_1 и P_2 – два его произвольных соседних элемента; B_k , $k = \overline{1, K}$, – ГСИ, а $B_{k,1}$ и $B_{k,2}$ – два вектора яркостей его соседних элементов.

Частотно-пространственные меры сходства

Рассмотрим три широко известные частотно-пространственные меры сходства двух соседних точек ГСИ – среднеквадратическую, корреляционную и спектрально-угловую [5]. Эти меры соответственно описываются следующими выражениями для двух точек ГСИ:

$$\Delta_{12} = \sqrt{\sum_k (B_{k,1} - B_{k,2})^2}, \quad (1)$$

$$\rho_{12} = \frac{1}{\sigma_1 \sigma_2} \left\{ \frac{1}{K} \sum_k (B_{k,1} B_{k,2}) - \frac{1}{K^2} \sum_k B_{k,1} \cdot \sum_k B_{k,2} \right\}, \quad (2)$$

$$\alpha_{12} = \arccos \left(\frac{\frac{1}{K} \sum_k (B_{k,1} B_{k,2})}{\sqrt{\frac{1}{K} \sum_k B_{k,1}^2} \sqrt{\frac{1}{K} \sum_k B_{k,2}^2}} \right), \quad (3)$$

где $k = \overline{1, K}$, σ_1 и σ_2 – среднеквадратические отклонения отсчетов спектральных характеристик двух соседних точек.

Здесь важно заметить, что в мерах (1) – (3) подавляющее влияние на оценку сходства оказывает произведение отсчетов двух сравниваемых СХ: $\sum_k (B_{k,1} B_{k,2})$.

В работе [4] показано, что эти меры связаны линейными соотношениями, т.е. одну меру можно выразить через другую.

Рассмотрим влияние электронного шума, возникающего в оптико-электронной съемочной аппаратуре, который характеризуется независимостью отсчетов шума, некоррелированностью с полезным сигналом и нулевым средним.

Для анализа влияния электронного шума, возникающего в процессе формирования как ГСИ, так и ПИ, на эффективность выделения границ объектов введем следующие допущения:

- панхроматическое изображение P получено датчиком с спектральной передаточной характеристикой $S(\lambda)$;

- ГСИ B_k , $k = \overline{1, K}$, получено гиперспектрометром в K узких соприкасающихся спектральных диапазонах $S_k(\lambda_k)$ со средними значениями частот λ_k , $k = \overline{1, K}$, так что $S_k(\lambda_k) = S(\lambda_k)$;

- яркость в каждой точке ПИ равна сумме яркостей ГСИ, т.е. $P = \sum_k B_k$;

- процессы формирования P и B_k , $k = \overline{1, K}$, сопровождаются наложением на эти изображения электронного шума ε с дисперсией D_ε .

В результате получим:

$$P = P^* + \varepsilon, \quad B_k = B_k^* + \varepsilon_k, \quad k = \overline{1, K},$$

где ε_k – случайная величина, распределенная также, как и ε , в k -м спектральном канале ГСИ, P^* и B_k^* – значения сигнала в отсутствие электронного шума. Если оптико-электронные матрицы панхроматического и гиперспектрального съемочных устройств одинаковы, то шум ПИ ε и ГСИ ε_k , $k = \overline{1, K}$ имеет одинаковые распределение: $\varepsilon_k = \varepsilon$, $k = \overline{1, K}$. В рамках введенной модели из ГСИ может быть сформировано ПИ:

$$\tilde{B} = \sum_k B_k = \sum_k (B_k^* + \varepsilon_k) = P^* + \sum_k \varepsilon_k.$$

Исходное ПИ характеризуется полезным сигналом P^* и дисперсией шума D_ε , а сформированное из ГСИ панхроматическое изображение – тем же полезным

сигналом P^* , но большей дисперсией шума:

$$D \left(\sum_{k=1}^K \varepsilon_k \right) = \sum_{k=1}^K D_{\varepsilon_k} = K D_\varepsilon.$$

Таким образом, при выделении границ на ГСИ шум оказывает гораздо большее влияние, чем при обработке ПИ.

Однако, так как каждой точке ГСИ соответствует вектор значений яркостей т.е. СХ, то это существенно улучшает решение задачи разделения объектов (при условии применения частотно-пространственных мер (1) – (3)). Для подтверждения этого рассмотрим две точки ГСИ в виде двух векторов в K -мерном пространстве. В этом случае мера различимости двух точек ГСИ – это расстояние между этими векторами, вычисленное с использованием одной из мер (1) – (3). В тоже время две точки ПИ – это два значения яркости, т.е. пространство, в котором сопоставляются точки ПИ, одномерное. Из физического смысла формирования ПИ следует, что излучение, отраженное от объектов сцены, интегрируется по всему спектральному диапазону наблюдения панхроматического датчика, что приводит, например, к одинаковому представлению объектов, имеющих разный цвет, но одинаковое альbedo (интегральный коэффициент отражения по всему спектральному диапазону). В тоже время ГСИ фиксирует СХ объектов, поэтому эти же объекты разного цвета с равным альbedo будут иметь разную СХ и могут быть различимы.

Для оценки влияния шума ГСИ в решении задачи выделения границ объектов рассмотрим граничный случай однородного участка (СХ совпадают): $B_{k,1} = B_{k,2} = B_k$, $k = \overline{1, K}$. В этом случае меры (1) – (3) с учетом шума ε с дисперсией D_ε принимают вид: $\Delta_{12} = \sqrt{2D_\varepsilon}$, $\rho_{12} = \frac{D}{D + D_\varepsilon}$, $\alpha_{12} \approx \arccos \left(1 + \frac{D_\varepsilon}{B^2} \right)^{-1}$, где D – дисперсия полезного сигнала B_k , а черта над выражением означает усреднение по $k = \overline{1, K}$. Таким образом: мера Δ_{12} не зависит от сигнала; ρ_{12} определяется отношением дисперсий сигнала и шума; α_{12} – отношением дисперсии шума и среднеквадратического значения сигнала.

В мерах (1) – (3) присутствуют оценки корреляционных моментов случайных векторов B_1 и B_2 :

$$\overline{B_1 B_2} = \frac{1}{K} \sum_k (B_{k,1} B_{k,2}),$$

$$\overline{B_1^2} = \frac{1}{K} \sum_k B_{k,1}^2, \quad \overline{B_2^2} = \frac{1}{K} \sum_k B_{k,2}^2.$$

$\overline{B_1 B_2}$ при большом K (100 и более отсчетов) практически не зависит от действия электронного шума ε , поскольку $\overline{\varepsilon_1}$, $\overline{\varepsilon_2}$ и $\overline{\varepsilon_1 \varepsilon_2}$ многократно уменьшаются (стремясь к нулю) при увеличении K .

Поэтому $\overline{B_1 B_2} = \overline{(B_1^* + \varepsilon_1)(B_2^* + \varepsilon_2)} \approx \overline{B_1^* B_2^*}$, а

$$\overline{B_1^2} \text{ и } \overline{B_2^2} \text{ зависят от шума: } \overline{B_1^2} = \overline{(B_1^* + \varepsilon_1)^2} = \overline{B_1^{*2}} + D_\varepsilon,$$

$$\overline{B_2^2} = \overline{(B_2^* + \varepsilon_2)^2} = \overline{B_2^{*2}} + D_\varepsilon.$$

Модификация частотно-пространственных мер сходства

Предлагается модифицировать меры (1) – (3) следующим образом:

$$\hat{\Delta}_{12} = \sqrt{\psi_1(\tau) - 2\overline{B_{k,1}B_{k,2}} + \psi_2(\tau)}, \quad (4)$$

$$\hat{\rho}_{12} = \frac{\overline{B_{k,1}B_{k,2}} - \overline{B_{k,1}} \cdot \overline{B_{k,2}}}{\psi_1(\tau) \cdot \psi_2(\tau)}, \quad (5)$$

$$\hat{\alpha}_{12} = \arccos \left(\frac{\overline{B_{k,1}B_{k,2}}}{\sqrt{\psi_1(\tau) \cdot \psi_2(\tau)}} \right), \quad (6)$$

где $\psi_1(\tau)$ и $\psi_2(\tau)$ – автокорреляционные функции, рассчитанные для СХ $B_{k,1}$ и СХ $B_{k,2}$, $k = \overline{1, K}$:

$$\psi_1(\tau) = \overline{B_{k,1}B_{k+\tau,1}} - \overline{B_{k,1}} \cdot \overline{B_{k+\tau,1}},$$

$$\psi_2(\tau) = \overline{B_{k,2}B_{k+\tau,2}} - \overline{B_{k,2}} \cdot \overline{B_{k+\tau,2}},$$

где τ – целочисленное значение смещения в автокорреляционной функции.

Влияние шума на меры (4) – (6) может быть также оценено при совпадении СХ $B_{k,1} = B_{k,2} = B_k$, $k = \overline{1, K}$:

$$\hat{\Delta}_{12} = \sqrt{2\overline{B_k B_{k+\tau}} - 2\overline{B_k}^2}, \quad (7)$$

$$\hat{\rho}_{12} = \frac{D}{\left(\overline{B_k B_{k+\tau}} - \overline{B_k} \cdot \overline{B_{k+\tau}} \right)^2}, \quad (8)$$

$$\hat{\alpha}_{12} = \arccos \left(\frac{\overline{B_k^2}}{\sqrt{2\overline{B_k B_{k+\tau}}}} \right). \quad (9)$$

Выражения (7) – (9) являются приближенными, и верны только при $K \rightarrow \infty$. Однако в случае ГСИ обычно $K > 100$, что приводит к существенному снижению влияния компонент шума, так что (7) – (9) могут быть применены. Как следует из (7) – (9), меры (4) – (6) не зависят от электронного шума \mathcal{E} . Меры (4) – (6) могут быть использованы только при сопоставлении точек ГСИ, так как автокорреляционная функция не определена для одномерных величин P_1 и P_2 на ПИ. При этом несколько нарушаются численные соответствия между исходными мерами (1) – (3) и вновь введенными (4) – (6). Однако при решении задачи выделения контуров на основе сопоставления СХ элементов ГСИ использование мер (4) – (6) позволяет получить более качественные результаты, особенно при малых отношениях сигнал/шум, прежде всего это касается структурно-одно-родных участков изображений, где СХ практически совпадают.

Выделение границ объектов на гиперспектральных снимках

Для применения рассмотренных мер при выделении границ объектов необходимо распространить их на случай оценки сходства элемента снимка с его ближайшим окружением [4]. Для этого можно использовать традиционные операторы (градиента, Собела, Кирша и др.), которые являются определенными функционалами от

разности яркостей анализируемого элемента и его окружающими [1, 8]. При анализе ГСИ предлагается использовать те же функционалы, но относительно не разности яркостей, а относительно введенных мер сходства СХ (4) – (6). Далее для примера рассматривается мера (5), аналогичным образом могут быть составлены операторы для мер (4) и (6).

Если $\hat{\rho}_{m+a,n+b} < 0$, то имеет место «обратная» корреляция. В этом случае анализируемые объекты имеют инверсные по форме СХ и по физическим соображениям можно считать, что объекты различны. Поэтому при $\hat{\rho}_{m+a,n+b} < 0$ величина меры принимается $\hat{\rho}_{m+a,n+b} = 0$.

Под $\hat{\rho}_{m+a,n+b}$ понимается значение меры сходства двух СХ ГСИ B_{mn} и $B_{m+a,n+b}$, соответствующих двум точкам ГСИ с координатами (m, n) и $(m+a, n+b)$, где a и b – смещения пространственных координат от анализируемой до ближайшей точки.

Запишем частотно-пространственные операторы выделения границ [2, 3, 4, 6] на основе меры (5):

- Оператор градиента:

$$G_{m,n} = \sqrt{\hat{\rho}_{m+1,n}^2 + \hat{\rho}_{m,n+1}^2}.$$

- Оператор Лапласа:

$$L_{m,n} = 0,25 \left(\hat{\rho}_{m-1,n} + \hat{\rho}_{m+1,n} + \hat{\rho}_{m,n-1} + \hat{\rho}_{m,n+1} \right).$$

- Оператор Собела:

$$S_{m,n} = \sqrt{\hat{\rho}_{mn}^2(X_1, X_2) + \hat{\rho}_{mn}^2(Y_1, Y_2)},$$

где

$$X_1 = B_{m+1,n-1} + 2B_{m+1,n} + B_{m+1,n+1},$$

$$X_2 = B_{m-1,n-1} + 2B_{m-1,n} + B_{m-1,n+1},$$

$$Y_1 = B_{m-1,n-1} + 2B_{m,n-1} + B_{m+1,n-1},$$

$$Y_2 = B_{m-1,n+1} + 2B_{m,n+1} + B_{m+1,n+1}.$$

- Оператор Кирша:

$$K_{m,n} = \min_i \left| \hat{\rho}_{mn}(S_i, T_i) \right|,$$

где $S_i = b_i + b_{i+1} + b_{i+2}$ и $T_i = b_{i+3} + b_{i+4} + b_{i+5} + b_{i+6} + b_{i+7}$, $i = \overline{0, 7}$, $b_0 = B_{m-1,n-1}$, $b_1 = B_{m,n-1}$, $b_2 = B_{m+1,n-1}$, $b_3 = B_{m-1,n}$, $b_4 = B_{m+1,n}$, $b_5 = B_{m-1,n+1}$, $b_6 = B_{m,n+1}$, $b_7 = B_{m+1,n+1}$, значение индекса i у величин b_i вычисляется по модулю 8.

Таким образом, при контурной обработке гиперспектральных изображений сопоставляются спектральные характеристики соседних точек, в то время как в традиционных алгоритмах – их яркости.

На рис. 1 в качестве примера представлены результаты выделения границ на гиперспектральном изображении, полученном российской космической системой «Ресурс-П» (в результате объединения гиперспектрального и высокодетального многозонального снимков). На рис. 1: слева сверху – исходное цветосинтезированное ГСИ; справа сверху – выделение границ с использова-

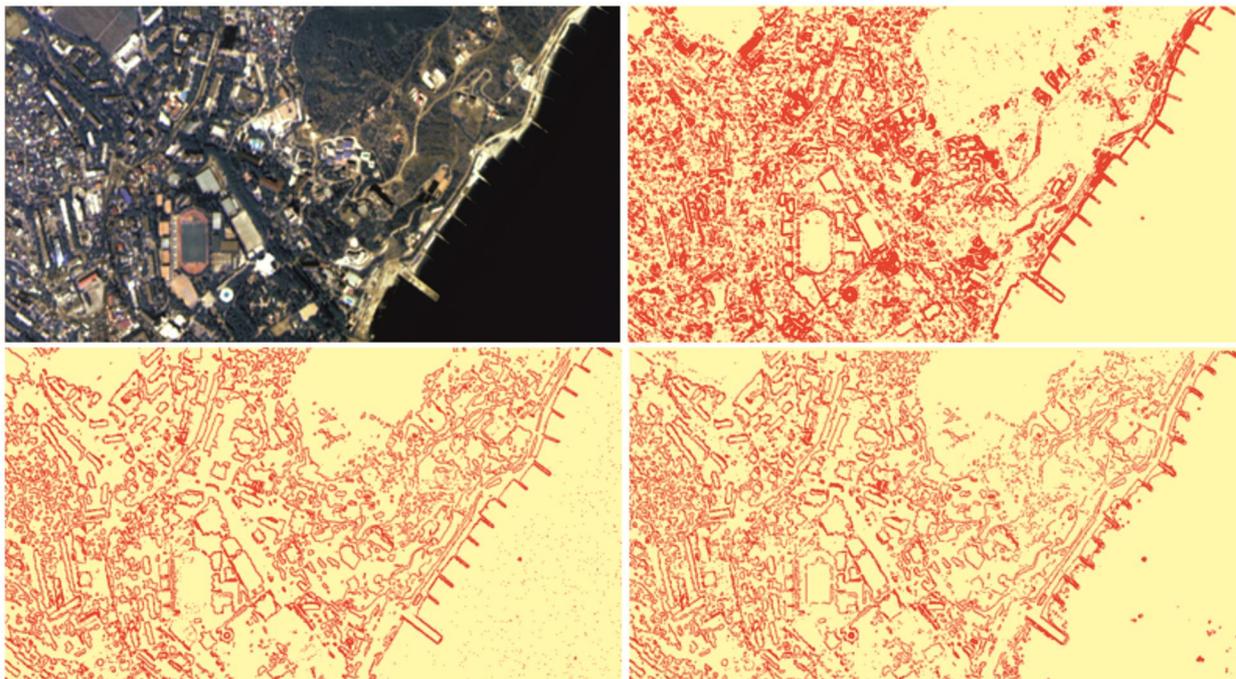


Рис. 1. Результаты выделения границ на ГСИ

с использованием традиционного оператора Градиента и частотно-пространственных мер сходства СХ соседних точек

нием традиционного оператора градиента (сопоставления яркостей соседних элементов); слева внизу – выделение границ с использованием меры (2) в операторе градиента (сопоставление СХ); справа внизу – выделение границ с использованием введенной меры (8) в операторе градиента (сопоставление СХ). Как видим, использование мер (4) и (8) в задаче выделения границ дает более качественные результаты по сравнению с традиционным оператором градиента, сопоставляющим яркости пикселей. При этом мера (8) позволяет выделить границы объектов с малой яркостью (береговая линия, уходящая под воду между пирсами) и в тоже время не создает излишних шумов на условно однородном объекте – водной поверхности.

Заключение

По результатам выполненных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Выполнен анализ известных подходов по выделению границ объектов на гиперспектральных снимках Земли. Исследованы известные частотно-пространственные меры сходства соседних элементов ГСИ, показано, что эти меры подвержены влиянию электронного шума на качество выделения границ объектов.

2. Предложены модифицированные частотно-пространственные меры сходства соседних элементов ГСИ, которые в отличие от известных мер, значительно меньше зависят от влияния аддитивного некоррелированного электронного шума.

3. Предложенные частотно-пространственные меры апробированы на натуральных изображениях от российской космической системы «Ресурс-П», показана их эффективность в задаче выделения границ объектов.

Литература

1. Прэтт У. Цифровая обработка изображений. М.: Мир, 1982. Т. 1, 2. 792 с.
2. 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 изображений. № 4. 2010. С. 38-43.
3. Еремеев В.В., Макаренков А.А., Юдаков А.А. Выделение границ объектов на данных дистанционной гиперспектральной съемки Земли с применением пространственных и частотно-пространственных мер сходства. Информатика и прикладная математика: межвуз. сб. науч. тр. Рязань: РГУ, 2011. Вып. 17. С. 46-49.
4. Ахметов Р.Н., Везенов В.И., Еремеев В.В., Стратилатов Н.Р., Юдаков А.А. Модели формирования и некоторые алгоритмы обработки гиперспектральных изображений. Исследование Земли из космоса. №1. 2014. С. 17-28.
5. Yuhas R.H., Goetz A. F. H., 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.
6. Еремеев В.В., Макаренков А.А., Юдаков А.А. Новые технологии автоматического выделения границ объектов на гиперспектральных изображениях земной поверхности. Информационные технологии в научных исследованиях: межвуз. сб. науч. тр. Рязань: РГПУ, 2012. С. 56-61.
7. Современные технологии обработки данных дистанционного зондирования Земли / Под ред. Еремеева В.В. М.: Физматлит, 2015. 460 с.
8. Яне Б. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2007. 584 с.