

УДК 004.932

ПОВЫШЕНИЕ ЧЕТКОСТИ ОТОБРАЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ НА ДАННЫХ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНОЙ СЪЕМКИ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

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

Макаренков А.А., аспирант РГРТУ

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

Юдаков А.А., аспирант РГРТУ

Ключевые слова: гиперспектральные изображения, комплексирование, спектральная характеристика, корреляция.

Введение

В ходе эволюции средств дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) прослеживается процесс повышения спектрального разрешения и расширения диапазонов длин волн, в которых производится съемка. При переходе от панхроматической съемки, при которой поток излучения регистрируется в широком диапазоне спектра (от ~0.4 до ~0.9 мкм), к мультиспектральным датчикам, фиксирующим излучение в нескольких спектральных диапазонах видимого (от ~0.4 до ~0.7 мкм), ближнего инфракрасного (от ~0.7 до 1.0 мкм) и инфракрасного излучения (от ~1.0 до ~2.5 мкм), появлялись новые возможности анализа характеристик объектов, для чего требуется создание принципиально новых алгоритмов обработки видеoinформации. Повышение спектрального разрешения, а вместе с ним и числа каналов изображения, создало предпосылки для решения задач выделения и классификации объектов снимка на качественно новом уровне. В последние годы активно ведутся разработки гиперспектральной аппаратуры (ГСА), позволяющей производить съемку одновременно в сотнях спектральных диапазонах. В этом случае каждая точка земной поверхности (пикселя изображения) сопровождается спектральной характеристикой (СХ), которая определяет физико-химические свойства наблюдаемых объектов. В настоящее время в практику ДЗЗ внедряются авиационные ГСА (AVIRIS, ProSpecTIR – США, НуМар – Австралия) и ГСА космического базирования (Hyperion, ARTEMIS – США, CHRIS – Евросоюз).

Наблюдаемые объекты земной поверхности обычно имеют сложную спектральную характеристику, поэтому в различных спектральных каналах гиперспектрального изображения (ГСИ) объекты могут отображаться совершенно по-разному: в одних каналах более светлыми, а в других – более темными по отношению к окружающим объектам. При этом различимость объектов в разных каналах ГСИ также не постоянна. Таким образом, отдельные каналы ГСИ не несут полной информации обо всех наблюдаемых объектах, а при традиционном подходе к объединению каналов – их усреднению – отдельные объекты существенно теряют контраст по отношению к исходным ГСИ. Это создает предпосылки к

Рассматривается задача комплексирования гиперспектральных снимков с целью формирования новых изображений, на которых с высокой четкостью отображаются все объекты. Представлены результаты обработки натурной гиперспектральной информации.

решению задачи комплексирования каналов ГСИ, т.е. формированию нового изображения, на котором с высокой четкостью представлены все наблюдаемые объекты.

Предпосылки для повышения по ГСИ четкости объектов

Рассмотрим съемку для следующего случая. Пусть имеется гиперспектральный датчик с K спектральными каналами и панхроматический датчик, снимающий в том же диапазоне длин волн. В результате съемки гиперспектральным датчиком двух точек земной поверхности будет сформировано два вектора яркостей $\mathbf{B}_1 = (B_{11}, B_{12}, \dots, B_{1K})$ и $\mathbf{B}_2 = (B_{21}, B_{22}, \dots, B_{2K})$. В результате съемки тех же точек панхроматическим датчиком будут сформированы два значения яркости

$B_1 = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K B_{1k}$ и $B_2 = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K B_{2k}$. Рассмотрим меры различимости этих точек на панхроматическом и гиперспектральном изображениях. Для панхроматического изображения в качестве меры различимости двух точек примем: $\ell = |B_1 - B_2| = \frac{1}{K} \left| \sum_{k=1}^K (B_{1k} - B_{2k}) \right| = \frac{1}{K} \left| \sum_{k=1}^K \Delta B_k \right|$. Для

гиперспектрального изображения в качестве меры различимости естественно принять расстояние между двумя точками в спектрально-пространственном пространстве, отнормировав его так, чтобы диапазон изменения совпадал с мерой

$\ell: d = \frac{1}{\sqrt{K}} \sqrt{\sum_{k=1}^K (B_{1k} - B_{2k})^2} = \frac{1}{\sqrt{K}} \sqrt{\sum_{k=1}^K \Delta B_k^2}$. Рассмотрим

отношение двух этих мер [1]:

$$\gamma = \frac{\ell}{d} = \frac{1}{\sqrt{K}} \left| \sum_{k=1}^K \Delta B_k \right| \bigg/ \sqrt{\sum_{k=1}^K \Delta B_k^2}.$$

Лишь при $x_1 = x_2 = \dots = x_s$: $\gamma = 1$, и гиперспектральная съемка не дает дополнительной информации для повышения четкости изображения. По мере взаимной компенсации приращений спектрально-пространственных компонент ($\ell \rightarrow 0$) создаются наилучшие условия для комплексирования гиперспектральных данных.

В настоящей статье рассматриваются различные

подходы к комплексированию каналов ГСИ с целью получения нового изображения, на котором с высокой четкостью отображаются все объекты, представленные в отдельных каналах гиперспектрального снимка. Алгоритмы основаны на анализе мер отличия спектральной характеристики от среднего уровня яркости, учете характера СХ, полиномиальном представлении СХ, комплексировании ГСИ на основе выделения границ. Проведен сравнительный анализ алгоритмов комплексирования с применением критерия точности передачи контуров. Приведены результаты апробации алгоритмов комплексирования на натурной гиперспектральной информации со съемочной системы ProСпекТIR-V.

Комплексирование ГСИ на основе мер отличия СХ от среднего уровня

Алгоритмы основаны на замене СХ в каждой точке ГСИ числом, которое характеризует степень отличия СХ от среднего значения яркости $\bar{B} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K B_k$, соответствующего панхроматической съемке. В качестве такой меры может быть принято СКО:

$$\gamma_1 = \sqrt{\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K (B_k - \bar{B})^2}. \quad (1)$$

В этом случае результат комплексирования B^* формируется как $B^* = \bar{B} + \gamma_1$. Мера (1) учитывает только степень отличия спектральной характеристики от среднего уровня яркости \bar{B} .

В качестве другой меры отличия спектральной характеристики от элемента панхроматического снимка можно принять спектральный угол α в k -мерном пространстве между векторами: $\mathbf{B}_\Pi = (\bar{B}, \bar{B}, \dots, \bar{B})$ и

$$\mathbf{B}_\Gamma = (B_1, B_2, \dots, B_K):$$

$$\gamma_2 = \cos(\alpha) = \frac{(\mathbf{B}_\Pi \cdot \mathbf{B}_\Gamma)}{|\mathbf{B}_\Pi| \cdot |\mathbf{B}_\Gamma|} = \frac{\bar{B}}{\sqrt{\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K B_k^2}}. \quad (2)$$

В данном случае: $B^* = \bar{B} \cdot \gamma_2$.

Меры (1) и (2) функционально связаны и отражают только отличие СХ от среднего уровня яркости точки \bar{B} . Можно показать, что $\gamma_1 = \bar{B} \sqrt{\gamma_2^2 - 1}$. Поэтому с точки зрения решения поставленной задачи меры γ_1 и γ_2 дают эквивалентные результаты. Например, две спектральные характеристики, имеющие разную форму, но имеют одно среднее значение (рис. 1), и γ_1 и γ_2 дают примерно одинаковую оценку.

Комплексирование ГСИ с учетом характера изменения СХ

Рассмотрим меру, учитывающую характер изменения СХ в зависимости от номера спектрального канала ГСИ:

$$\gamma_3 = \frac{\sum_{k=1}^K (K+1-k) B_k}{\sum_{k=1}^K k B_k}. \quad (4)$$

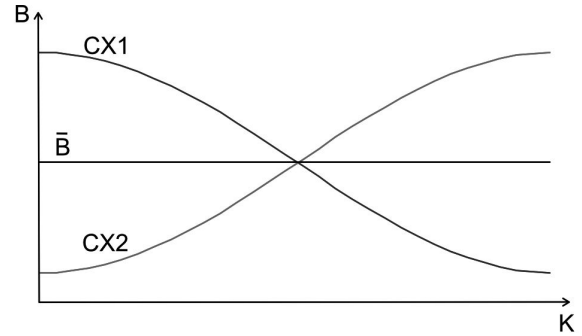


Рис. 1. Спектральные характеристики двух точек ГСИ

Мера γ_3 описывает характер изменения компонент B_1, B_2, \dots, B_K по мере изменения номера канала $k = 1..K$. Представим числитель (4) в виде:

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^K (K+1-k) B_k &= \\ &= (k+1) \sum_{k=1}^K B_k - \sum_{k=1}^K k B_k = (k+1) \bar{B} - \sum_{k=1}^K k B_k. \end{aligned}$$

Тогда:

$$\gamma_3 = \frac{(k+1) \bar{B}}{\sum_{k=1}^K k B_k} - 1.$$

Здесь, в отличие от γ_1 и γ_2 , сопоставляются \bar{B} и $\sum_{k=1}^K k B_k$. Последняя компонента реагирует на характер изменения спектральной характеристики по мере увеличения номера канала. Для представленных на рис.1 спектральных характеристик мера γ_3 будет иметь различную величину для CX1 и CX2.

Комплексирование ГСИ на основе полиномиального представления СХ

Другим подходом к анализу СХ является ее аппроксимация степенным полиномом и рассмотрение взаимного расположения полинома и среднего уровня яркости. Рассмотрим аппроксимацию СХ полиномом 3-го порядка. Здесь возможны три варианта взаимного расположения полинома и среднего уровня яркости: полином пересекает средний уровень \bar{B} в одной, двух и трех точках. В первом случае меру, описывающую характер изменения СХ, можно записать как

$$\gamma_4 = \begin{cases} -\sqrt{\frac{S_1 \cdot S_2}{n_1 \cdot n_2}}, & S_1 < 0; \\ \sqrt{\frac{S_1 \cdot S_2}{n_1 \cdot n_2}}, & S_1 > 0, \end{cases}$$

где $S_1 = \sum_{k=0}^{k_1} (B_k - \bar{B})$, k_1 – номер канала, в котором полином пересекает средний уровень яркости, B_k – яркость аппроксимированной полиномом СХ в канале k , \bar{B} – средний уровень яркости СХ исходного ГСИ, $S_2 = \sum_{k=k_1}^{K} (B_k - \bar{B})$, $n_1 = k_1$, $n_2 = K - k_1$.

В случае пересечения полинома и среднего уровня яркости в двух точках:

$$\gamma_4 = \begin{cases} -\sqrt[3]{\frac{S_1 \cdot S_2 \cdot S_3}{n_1 \cdot n_2 \cdot n_3}}, & S_1 < 0; \\ \sqrt[3]{\frac{S_1 \cdot S_2 \cdot S_3}{n_1 \cdot n_2 \cdot n_3}}, & S_1 > 0, \end{cases}$$

где $S_2 = \sum_{k=k_1}^{k_2} (B_k - \bar{B})$, k_2 – вторая точка пересечения полиномом уровня \bar{B} , $S_3 = \sum_{k=k_2}^{K} (B_k - \bar{B})$, $n_1 = k_1$,

$n_2 = k_2 - k_1$, $n_3 = K - k_2$.

При пересечения полиномом уровня \bar{B} в трех точках (рис. 2.)

$$\gamma_4 = \begin{cases} -\sqrt[4]{\frac{S_1 \cdot S_2 \cdot S_3 \cdot S_4}{n_1 \cdot n_2 \cdot n_3 \cdot n_4}}, & S_1 < 0; \\ \sqrt[4]{\frac{S_1 \cdot S_2 \cdot S_3 \cdot S_4}{n_1 \cdot n_2 \cdot n_3 \cdot n_4}}, & S_1 > 0, \end{cases}$$

где $S_1 = \sum_{k=0}^{k_1} (B_k - \bar{B})$, $S_2 = \sum_{k=k_1}^{k_2} (B_k - \bar{B})$,

$S_3 = \sum_{k=k_2}^{k_3} (B_k - \bar{B})$, $S_4 = \sum_{k=k_3}^{K} (B_k - \bar{B})$, $n_1 = k_1$,

$n_2 = k_2 - k_1$, $n_3 = k_3 - k_2$, $n_4 = K - k_3$.

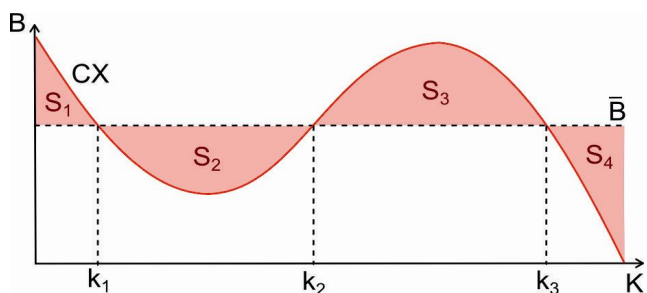


Рис. 2. Полиномиальное представление спектральной характеристики

Полиномиальное представление СХ позволяет снизить влияние шума, нелинейности передаточной характеристики датчика, атмосферных искажений. Это позволяет достичь лучшего качества комплексирования.

Формирование по ГСИ панхроматического изображения на основе выделения границ объектов

Вначале с использованием ГСИ выделяются границы объектов на основе корреляционного сопоставления спектральных характеристик [2]. Принадлежность элемента B_{mn} (m, n – соответственно номера элементов по строке и столбцу) определяется корреляционной мерой сходства его СХ с соседними элементами:

$$\tilde{\rho}_{mn} = \sqrt{\rho_{mn}^2 + \rho_{m,n+1}^2},$$

где $\rho_{mn} = \frac{B_{mn} \cdot B_{m+1,n} - \bar{B}_{mn} \cdot \bar{B}_{m+1,n}}{\sigma_{mn} \cdot \sigma_{m+1,n}}$, а черта над выраже-

ниями означает операцию усреднения по всем спектральным каналам.

Комплексирование ГСИ заключается в объединении каналов изображения по одному из алгоритмов, представленных выше. После этого выполняется совмещение скомплексированного ГСИ с результатом выделения границ с использованием меры

$$\gamma_5 = B^* + B^* \cdot (1 - \tilde{\rho}) = B^* (2 - \tilde{\rho}),$$

где $\tilde{\rho}$ – изображение границ объектов.

Результаты комплексирования натуральных ГСИ, полученных с авиационного датчика ProSpecTir-V (США), представлены на рис. 3: изображения A – результат усреднения каналов ГСИ, B – на основе полиномиального представления СХ, C – на основе выделения границ, D – по формуле (3). Из рисунка видно, что наилучший результат дает алгоритм комплексирования на основе полиномиального представления СХ.

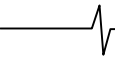
Заключение

При сравнении рассмотренных алгоритмов важным вопросом является численная оценка качества комплексирования. Поскольку целью поставленной задачи является повышение четкости отображения объектов, то для оценки качества этого процесса в работе [1] предложено использовать степень сохранения градиентов яркости по отношению к исходным изображениям. Предлагается оценивать не степень сохранения, а степень улучшения градиента.

Степень улучшения модуля градиента элемента (m, n) при переходе от изображения A к изображению F определим как

$$G^{AF}(x, y) = \begin{cases} \frac{g_F(m, n)}{g_A(m, n)}, & g_A(m, n) > g_F(m, n); \\ 1, & g_A(m, n) < g_F(m, n), \end{cases}$$

где $g_F(m, n)$ – модуль градиента в точке (x, y) (результат обработки изображения F оператором Собела).



Мера, оценивающая степень сохранения направления градиента при переходе от изображения A в изображение F , определяется как

$$A^{AF}(m,n) = \frac{\left| \alpha_A(m,n) - \alpha_F(m,n) - \pi/2 \right|}{\pi/2},$$

где $\alpha_F(m,n) = \arctan(S_F^Y(m,n)/S_F^X(m,n))$ – направление градиента, $S_F^Y(m,n)$ – элемент (m,n) изображения, отфильтрованного вертикальным «окном» оператора Собела, $S_F^X(m,n)$ – элемент (m,n) изображения, отфильтрованного горизонтальным «окном» оператора Собела [3].

В [2] предлагается использовать нелинейные функции Q_G^{AF} и Q_A^{AF} , учитывающие чувствительность глаза к изменениям модуля и направления градиента. В этом случае:

$$Q^{AF}(m,n) = \sqrt{Q_G^{AF}(m,n)Q_A^{AF}(m,n)}.$$

Величина $Q^{AF} \in \{0,0,1,0\}$, при этом 0 – полная потеря информации, 1 – полное сохранение градиента. По всему полю изображения, в случае сравнения двух исходных снимков A и B с результатом F , мера рассчитывается как взвешенная сумма:

$$Q^{AB/F} = \frac{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N [\omega_A(m,n)Q^{AF}(m,n) + \omega_B(m,n)Q^{BF}(m,n)]}{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N [\omega_A(m,n) + \omega_B(m,n)]}, \quad (5)$$

где $\omega_A(m,n)$ – информативность элемента (m,n) на изображении A . В качестве информативности в [2] пред-

лагается принять значение градиента в точке (m,n) . Результаты оценки качества комплексирования по (5) представлены в таблице:

Алгоритм комплексирования	Качество
СКО (γ_1)	0.12
Спектральный угол (γ_2)	0.09
Характер изменения СХ (γ_3)	0.30
Полиномиальное представление СХ (γ_4)	0.67
Выделение границ (γ_5)	0.14

Таким образом, рассмотрено несколько алгоритмов комплексирования гиперспектральных изображений. Представлено математическое обоснование целесообразности комплексирования каналов ГСИ для формирования нового изображения, на котором с высокой четкостью отображаются все объекты. Выполнена численная оценка качества функционирования алгоритмов с использованием критерия улучшения модуля градиента и сохранения его направления. Результаты работы алгоритмов апробированы на натуральных данных с авиационной гиперспектральной съемочной системы ProSpecTIR-V (США). На рис.3 на изображении B по сравнению с A наблюдается подчеркивание границ объектов за счет объединения скомплексированного изображения и коэффициентов корреляции СХ в граничных точках. На изображении B по сравнению с A с повышенной четкостью отображаются растительные объекты, улучшен контраст между строениями и дорожным покрытием (области явного улучшения выделены белыми окружностями). На изображении Γ с высоким контрастом представлены водные объекты, растительность – черным цветом.



а)



б)

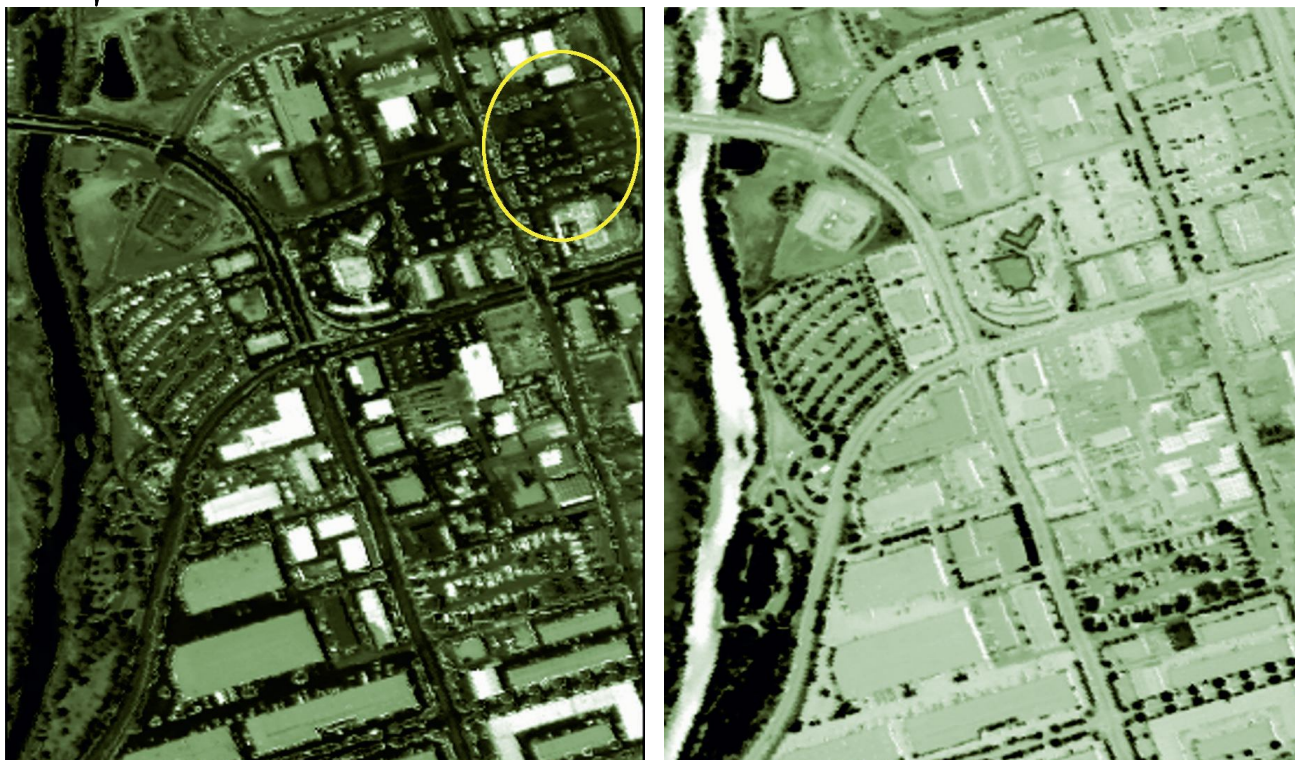


Рис. 3. Результаты комплексирования авиационного гиперспектрального снимка: а) усреднение каналов; б) полиномиальное представление CX ; в) комплексирование на основе выделения границ; г) комплексирование с учетом характера изменения CX

Литература

1. 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.
2. Costas Xydeas, Vladimir Petrovic. Pixel-level image fusion metrics. Image fusion: algorithms and applications. – Great Britain: Academic Press, 2008. pp 429-450.
3. Претт У. Цифровая обработка изображения: Пер. с англ. – М.: Мир, 1982. – Кн.2 – 480 с.

OBJECTS READABILITY IMPROVING ON HYPERSPECTRAL IMAGERY OF EARTH SURFACE

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

Hyperspectral imagery fusion for creation of new images with all objects presented with high readability were examined. Processing results of hyperspectral data were presented.

НОВЫЕ КНИГИ



Умняшкин С.В.

Теоретические основы цифровой обработки и представления сигналов:

Учебное пособие.

Второе издание, исправленное и дополненное

Москва: Техносфера, 2012 - 368 с.

Предназначено для студентов вузов, обучающихся по направлениям «Информатика и вычислительная техника» и «Прикладная математика». Включает в себя рассмотрение общих теоретических вопросов, связанных с цифровым представлением сигналов, основами анализа линейных дискретных систем. Значительное внимание уделено вопросам эффективного представления информации (сжатия данных) и использования вейвлет-преобразования. Может быть рекомендовано в качестве дополнительного материала для направлений подготовки радиотехнического и телекоммуникационного профиля.