

## ОСОБЕННОСТИ АНАЛИЗА И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ ОТ СИСТЕМ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНОЙ СЪЕМКИ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

*Антонушкина С.В., с.н.с. НИИ «Фотон» Рязанского государственного радиотехнического университета (РГРТУ), к.т.н., foton@rsreu.ru*  
*Еремеев В.В., директор НИИ «Фотон» РГРТУ, д.т.н., foton@rsreu.ru*  
*Макаренков А.А., аспирант*  
*Москвитин А.Э., с.н.с. НИИ «Фотон» РГРТУ, к.т.н.*

**Ключевые слова:** гиперспектральные изображения, гиперкуб, анализ гиперспектральной информации, комплексирование, гистограмма.

### Введение

В практику дистанционных исследований Земли в последние годы активно внедряются системы гиперспектральной съемки. Гиперспектральная съемка земной поверхности осуществляется в процессе движения спутника или самолета путем приема оптической системой излучения от Земли, его расщепления по длине волны и регистрации с помощью приборов с зарядовой связью (ПЗС-линеек), которые устанавливаются друг за другом в фокальной плоскости датчика, перпендикулярно полету носителя. В результате движения носителя и периодического опроса ПЗС-линеек формируется ГСИ, так называемый гиперкуб, в виде набора снимков, каждый из которых характеризует энергию излучения объектов наблюдаемой сцены в очень узком диапазоне спектра. По такому принципу построена, например, гиперспектральная аппаратура, установленная на космических аппаратах EarthObserver-1, Terra, Aqua и др. В России гиперспектральную аппаратуру впервые планируется установить на космический аппарат «Ресурс-П».

В результате расщепления входного потока излучения при формировании гиперспектральных снимков многократно повышается уровень шума по отношению к полезному сигналу, это создает основную трудность при анализе и обработке ГСИ. В тоже время ГСИ, в отличие от панхроматических и спектросональных снимков, предоставляют уникальную возможность более качественно решить задачу автоматической классификации на изображениях заданных объектов на основе анализа их спектральных характеристик.

В настоящей работе представлены первые результаты, полученные при решении задач сегментации и комплексирования ГСИ. Экспериментальная проверка предложенных решений выполнена с привлечением реальной информации, полученной в результате гиперспектральной аэросъемки Земли, которая предоставлена авторам ОАО «Красногорский завод им. С.А. Зверева» (рис. 1).

### Меры сходства элементов ГСИ

На тех или иных мерах сходства элементов изображения основаны многие алгоритмы кластеризации и комплексирования. В отличие от традиционных мер, основанных на

*Рассматриваются вопросы анализа гиперспектральных изображений (ГСИ) земной поверхности: меры сходства элементов ГСИ, комплексирование ГСИ со снимками от других съемочных систем, кластеризация объектов изображения. Представлены результаты исследований алгоритмов анализа гиперспектральных изображений, полученных в результате аэросъемки земной поверхности.*

сопоставлении пространственно-энергетических характеристик, ГСИ дополнительно предоставляет для каждого элемента изображения детальную информацию о распределении энергии излучения по частоте (частотную характеристику). Это дает возможность вводить новые более качественные меры сходства элементов изображения.

Введем в рассмотрение гиперспектральное изображение  $B \in \{B_{kmn}, k = \overline{1, K}, m = \overline{1, M}, n = \overline{1, N}\}$ , где  $k$  – номер спектрального диапазона,  $(m, n)$  – координаты элемента изображения (его номер по строке и по столбцу),  $B$  – энергетическая яркость. Фиксированному  $k$  соответствует изображение, зарегистрированное в  $k$ -м спектральном диапазоне в виде матрицы значений энергетических яркостей:  $B_{kmn}, m = \overline{1, M}, n = \overline{1, N}, k = const$ . Точке изображения с фиксированными координатами  $(m, n)$  соответствует частотная характеристика в виде вектора из  $K$  значений энергетических яркостей для каждого частотного диапазона:  $B_{kmn}, k = \overline{1, K}, m = const, n = const$ .

Рассмотрим три частотно-пространственные меры сходства двух соседних по строке точек ГСИ – среднеквадратическую, корреляционную и спектрально-угловую [2], которые соответственно описываются следующими выражениями:

$$\Delta_{mn} = \sqrt{(B_{mn} - B_{m+1,n})^2}, \quad (1)$$

$$\rho_{mn} = \frac{B_{mn} \cdot B_{m+1,n} - \overline{B_{mn}} \cdot \overline{B_{m+1,n}}}{\sigma_{mn} \cdot \sigma_{m+1,n}}, \quad (2)$$

$$\alpha_{mn} = \arccos \left( \frac{B_{mn} \cdot B_{m+1,n}}{\sqrt{B_{mn}^2} \cdot \sqrt{B_{m+1,n}^2}} \right), \quad (3)$$

где  $\sigma_{mn}$  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,

например:  $\overline{B_{mn}} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K B_{mnk}$ .

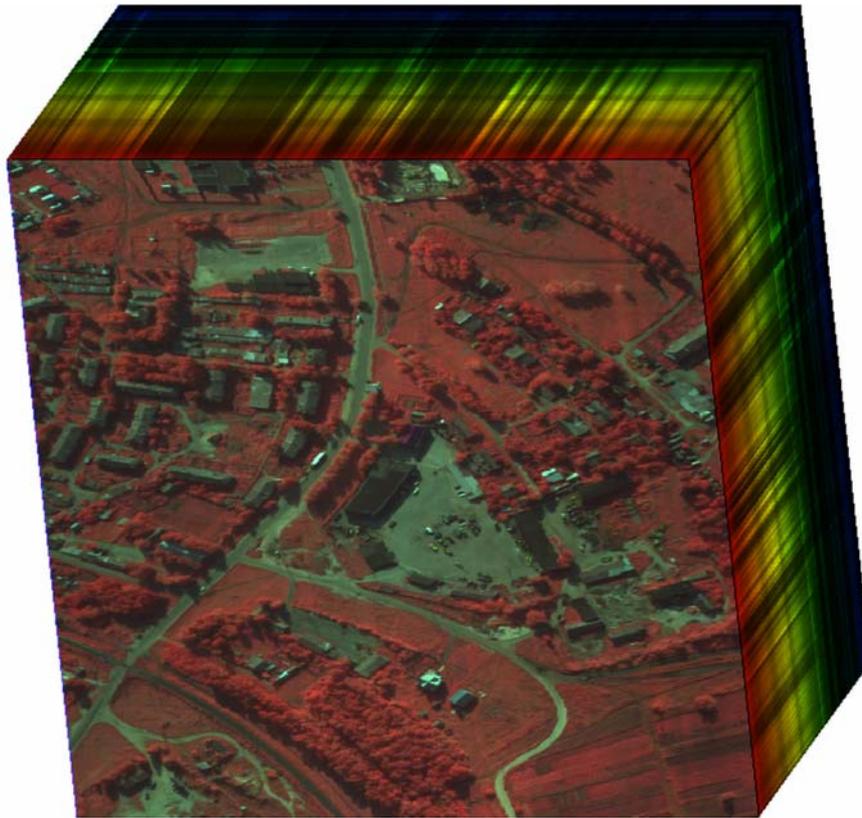


Рис. 1. Гиперкуб данных самолетной съемки Земли

Мера (1) характеризует среднеквадратическое отличие яркостей соседних элементов изображения с координатами  $(m, n)$  и  $(m+1, n)$ . Мера (2) описывается коэффициентом корреляции между спектральными характеристиками, определенными для тех же соседних элементов. Мера (3) численно равна углу в  $K$ -мерном спектральном пространстве.

Покажем, что мера (1) путем линейных преобразований спектральных характеристик может быть приведена к (2). Для этого рассмотрим две точки гиперспектрального снимка  $B_{mnk}$  и  $B_{m+1,nk}$  и приведем соответствующие им частотные характеристики к единым среднему  $\bar{B}$  и СКО  $\sigma$ , найденным по всему гиперкубу. Выполним линейные преобразования  $B_{mnk}$  и  $B_{m+1,nk}$  в  $B_{mnk}^*$  и  $B_{m+1,nk}^*$ :

$$B_{mnk}^* = a_{mn} B_{mnk} + c_{mn},$$

$$B_{m+1,nk}^* = a_{m+1,n} B_{m+1,nk} + c_{m+1,n}, \quad (4)$$

где  $a$  и  $c$  – коэффициенты. Запишем выражения для средних значений:  $B_{mn}^* = \bar{B} = a_{mn} \bar{B}_{mn} + c_{mn}$ ,  $B_{m+1,n}^* = \bar{B} = a_{m+1,n} \bar{B}_{m+1,n} + c_{m+1,n}$  и СКО:  $\sigma_{mn} = \sigma = a_{mn} \sigma_{mn}$ ,  $\sigma_{m+1,n} = \sigma = a_{m+1,n} \sigma_{m+1,n}$ . С учетом этих соотношений:

$$a_{mn} = \frac{\sigma}{\sigma_{mn}}, \quad a_{m+1,n} = \frac{\sigma}{\sigma_{m+1,n}}, \quad (5)$$

$$c_{mn} = \bar{B} - \frac{\sigma}{\sigma_{mn}} \bar{B}_{mn}, \quad c_{m+1,n} = \bar{B} - \frac{\sigma}{\sigma_{m+1,n}} \bar{B}_{m+1,n}. \quad (6)$$

Выполним с учетом (5) и (6) преобразование (4) и на основе полученных  $B_{mnk}^*$  и  $B_{m+1,nk}^*$  вычислим меру:

$$\Delta_{mn}^* = \sqrt{(B_{mn}^* - B_{m+1,n}^*)^2}, \quad (7)$$

где  $B_{mnk}^* = \frac{\sigma}{\sigma_{mn}} (B_{mnk} - \bar{B}_{mn}) + \bar{B}$ ,

$$B_{m+1,nk}^* = \frac{\sigma}{\sigma_{m+1,n}} (B_{m+1,nk} - \bar{B}_{m+1,n}) + \bar{B}. \quad (8)$$

После преобразований получим

$$(B_{mnk}^* - B_{m+1,nk}^*)^2 = \sigma^2 \cdot \left[ \left( \frac{B_{mnk} - \bar{B}_{mn}}{\sigma_{mn}} \right)^2 - 2 \frac{(B_{mnk} - \bar{B}_{mn})(B_{m+1,nk} - \bar{B}_{m+1,n})}{\sigma_{mn} \sigma_{m+1,n}} + \left( \frac{B_{m+1,nk} - \bar{B}_{m+1,n}}{\sigma_{m+1,n}} \right)^2 \right]$$

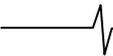
Можно показать, что усреднение последнего выражения по  $k = 1, K$  приводит к формуле:

$$\Delta_{mn}^* = \sigma \sqrt{2(1 - \rho_{mn})}. \quad (9)$$

Выражение (9) устанавливает связь между двумя мерами близости элементов изображения  $\Delta_{mn}^*$ , вычисляемой по формуле (7), и  $\rho_{mn}$ , определяемой (2). С учетом этого для дальнейшего анализа будем использовать меру (2).

Для определения меры близости элемента ГСИ  $B_{kmn}$  с тем или иным набором окружающих элементов можно воспользоваться операторами, используемыми для анализа в пространственной области: операторы градиента, Лапласа, Собела, Кирша и др. С привлечением натурной ГСИ выполнено сопоставление частотно-пространственных мер (2) и (3) в форме оператора градиента, как между собой, так и с оператором градиента, представленном в традиционном виде – в пространственной области. В этом случае меры (2), (3) в форме оператора градиента представляются как

$$\tilde{\rho}_{mn} = \sqrt{\rho_{mn}^2 + \rho_{m,n+1}^2}, \quad \tilde{\alpha}_{mn} = \sqrt{\alpha_{mn}^2 + \alpha_{m,n+1}^2}, \quad (10)$$



а собственно оператор градиента принимает значение

$$G_{mn} = \sqrt{(\overline{B}_{mn} - \overline{B}_{m+1,n})^2 + (\overline{B}_{mn} - \overline{B}_{m,n+1})^2}. \quad (11)$$

На рис. 2 в качестве примера в виде изображений представлены меры сходства точек ГСИ: слева – для



оператора градиента (11), справа – для частотно-пространственного корреляционного оператора (2). Как видим, оператор (2) дает лучшие результаты и может быть эффективно использован при реализации различных подходов сегментации гиперспектральных изображений.

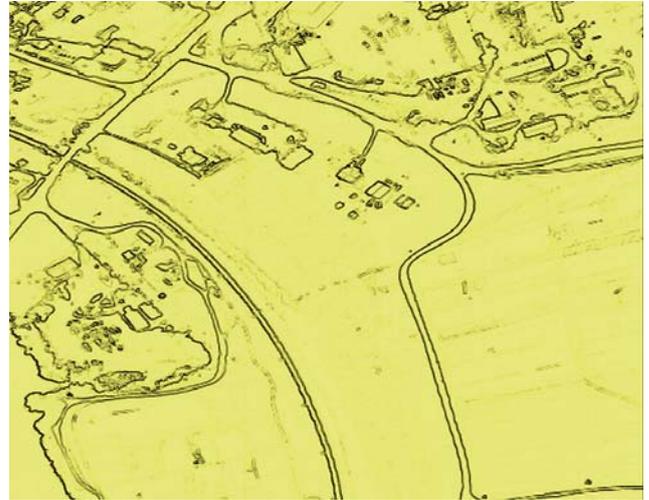


Рис. 2. Графическое отображение мер сходства (11) и (2)

### Комплексирование ГСИ

При гиперспектральной съемке объекты наблюдаемой сцены совершенно по-разному отображаются в различных спектральных диапазонах. Часто наблюдается, что некоторый объект отображается более светлым по отношению к окружающей сцене в одних диапазонах и более темным в других. В результате этого при панхроматической съемке, при которой осуществляется интегрирование лучистой энергии в широком диапазоне спектра, такие объекты значительно теряют контраст либо вовсе становятся незаметными на снимках. Поэтому, в отличие от панхроматических снимков, ГСИ дают возможность сформировать некое новое изображение, в котором с высокой четкостью отображаются все объекты наблюдаемой сцены. Этот факт можно объяснить и аналитически, сопоставляя некоторые меры различимости объектов при панхроматической и гиперспектральной съемке.

Рассмотрим два элемента ГСИ  $B_{mnk}$  и  $B_{stk}$ ,  $k = \overline{1, K}$ . В качестве меры различимости этих элементов на панхроматическом снимке естественно принять

$$d_{\Pi} = \left| \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K B_{mnk} - \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K B_{stk} \right| = \left| \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K (B_{mnk} - B_{stk}) \right|. \quad (12)$$

Для ГСИ в качестве меры различимости может быть принято расстояние между рассматриваемым точками в  $K$ -мерном спектральном пространстве:

$$d_{\Gamma} = \sqrt{\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K (B_{mnk} - B_{stk})^2}. \quad (13)$$

Эффективность использования ГСИ для комплексирования охарактеризуем отношением

$$\gamma = \frac{d_{\Pi}}{d_{\Gamma}} = \frac{\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K |B_{mnk} - B_{stk}|}{\sqrt{\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K (B_{mnk} - B_{stk})^2}} = \sqrt{\frac{(\overline{B}_{mn} - \overline{B}_{st})^2}{K(\overline{B}_{mn} - \overline{B}_{st})^2}}. \quad (14)$$

Всегда  $\gamma \geq 1$ . Лишь при  $B_{mnk} - B_{stk} = const$  для всех значений  $k = \overline{1, K}$ :  $\gamma = 1$ , и гиперспектральная съемка не дает дополнительной информации для повышения четкости изображения. По мере взаимной компенсации приращений спектральных компонент  $d_{\Pi}$  стремится к нулю, и создаются наилучшие условия для комплексирования гиперспектральных данных. В этом предельном случае

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{K}} \sqrt{1 + \frac{2 \sum_{j=1}^K \sum_{i=j+1}^K (B_{mnj} - B_{stj})(B_{mni} - B_{sti})}{\sum_{k=1}^K (B_{mnk} - B_{stk})^2}} = \frac{1}{\sqrt{K}}. \quad (15)$$

Рассмотрим один из апробированных алгоритмов комплексирования спектральных изображений [1], обобщенный на случай решения этой задачи с использованием ГСИ. Разделим изображения гиперкуба  $B \in \{B_k, k = \overline{1, K}\}$  на низко- и высокочастотные части:  $B_k = B_{kH} + B_{kB}$ ,  $k = \overline{1, K}$ . Для этого путем расфокусировки  $B_k$ ,  $k = \overline{1, K}$ , сформируем низкочастотные составляющие  $B_{kH}$ ,  $k = \overline{1, K}$ , а затем – высокочастотные составляющие  $B_{kB} = B_k - B_{kH}$ ,  $k = \overline{1, K}$ . После этого путем взвешенного суммирования скомплексировав низкочастотные составляющие в виде изображения  $D_H$ :

$$D_H = \sum_{k=1}^K \alpha_k B_{kH}, \quad (16)$$

где коэффициенты  $\alpha_k$  вычисляются для каждого элемента изображения  $D_H$  и характеризуют уникальность исходных пикселей:

$$\alpha_k = \frac{\sum_{j=1}^K \delta_{kj}}{\sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^K \delta_{kj}}, \quad (17)$$

где  $\delta_{kj} = |B_{kH} - B_{jH}|$ , т.е. чем больше яркость элемента одного изображения отличается от яркостей этого же элемента в других изображениях, тем с большим весом пиксель участвует в формировании элемента результирующего изображения. В результате формируется низкочастотная компонента  $D_H$  результирующего изображения  $D$ . Формирование высокочастотной компоненты  $D_B$  результирующего изображения осуществляется следующим образом:

$$D_B = s \cdot \max_k |B_{kB}|, \quad k = \overline{1, K},$$

где  $s$  – знак выражения  $\sum_{k=1}^K \alpha_k B_{kB}$ .

В итоге результат комплексирования ГСИ формируется как сумма скомплексированных низко- и высокочастотных составляющих:  $D = D_B + D_H$ . На рис. 3 представлены: слева – в псевдоцвете панхроматическое изображение, справа – результат комплексирования ГСИ.



Рис. 3. Результат комплексирования ГСИ

**Комплексирование ГСИ с данными высокодетальной съемки**

Обычно в процесс формирования ГСИ осуществляется синхронная панхроматическая и (или) спектрзональная съемка Земли с многократно большей пространственной разрешающей способностью (детальностью). Стоит задача комплексирования видеоинформации, имеющей высокое спектральное разрешение, с данными высокодетальной съемки Земли с целью получения ГСИ с высокими и спектральным, и пространственным разрешением.

Пусть  $D \in \{D_i(r, s), i = \overline{1, I}, I < K\}$  – спектрзональное изображение с  $I$  каналами, определенное в узлах частой прямоугольной решетки  $(r, s)$ ,  $r = \overline{1, R}$ ,  $s = \overline{1, S}$ , а  $B^* \in \{B_k, k = \overline{1, K}\}$  – гиперспектральное изображение с более низким пространственным разрешением, зарегистрированное в узлах редкой прямоугольной решетки  $(m, n)$ ,  $m = \overline{1, M}$ ,  $n = \overline{1, N}$ ,  $m = \mu r$ ,  $n = \mu s$ , где  $\mu$  – целочисленный масштабный коэффициент ( $\mu = 2, 3, 4, \dots$ ). Рассмотрим алгоритм комплексирования изображений  $B$  и  $D$ .

Алгоритм основан на оценке функции распределения спектральной яркости для любой точки земной поверхности  $E(\lambda)$  и формировании на ее основе спектральных компонент  $B_k, k = \overline{1, K}$ :

$$B_k = \int_{\lambda \in \Lambda_k} E(\lambda) S(\lambda) d\lambda, \quad k = \overline{1, K}, \quad (18)$$

где  $S(\lambda)$  – функция относительной спектральной чувствительности видеодатчика, измеряемая на стадии предполетных испытаний,  $\Lambda_k$  –  $k$ -й спектральный диапазон.

После оценки  $E(\lambda)$  формируется ГСИ  $B_c \in \{B_{ck}, k = \overline{1, K}\}$  с высоким пространственным разрешением путем модуляции спектрзональным изображением  $D$  спектральных компонент  $B_k$ :

$$B_{ck} = D_i \frac{\int_{\lambda \in \Lambda_k} E(\lambda) S(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda \in \Lambda_i} E(\lambda) S(\lambda) d\lambda}, \quad k = \overline{1, K}, \quad i = \text{ent}\left(k \frac{I}{K}\right), \quad (19)$$

где  $\Lambda_k$  и  $\Lambda_i$  – соответственно спектральные диапазоны изображений  $B_k$  и  $D_i$ .

Для экспериментальных исследований алгоритма выполнено моделирование ГСИ низкого пространственного разрешения  $B^*$  путем прореживания отсчетов исходного ГСИ (см. рис. 1) в 5, 10, 20 и 30 раз. Затем из  $B^*$  в частой решетке  $(r, s)$  формировался гиперкуб данных  $\tilde{B} \in \{\tilde{B}_k, k = \overline{1, K}\}$  путем пространственной билинейной интерполяции. Многозональное изображение  $D$  формировалось в решетке  $(r, s)$  как результат усреднения по  $k$  в  $I$  поддиапазонах данных исходного гиперкуба  $B$ .

На рис. 4 представлен результат комплексирования ГСИ  $B^*$  и многозонального изображения  $D$  в виде изображения  $B_c$ .

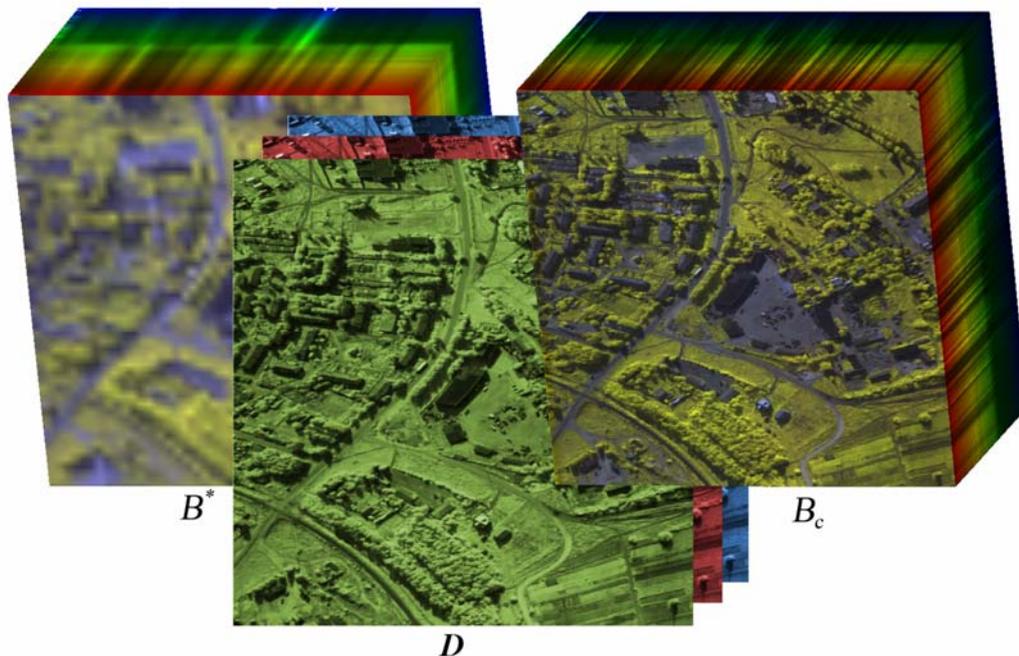


Рис. 4. Результат комплексирования  $B^*$  с  $D$

Принципиально важным является вопрос о точности восстановления спектральных характеристик в точках  $(r, s)$ , не совпадающих с узлами решетки  $(m, n)$ . При известной функции спектральной чувствительности многозонального датчика  $\alpha(\lambda)$ :

$$\tilde{B}_k = \int_{\lambda \in \Lambda_k} \alpha(\lambda) D_i d\lambda, \quad k = \overline{1, K}, \quad i = \text{ent} \left( I \frac{k}{K} \right). \quad (20)$$

С другой стороны,

$$\bar{B}_{ck} = D_i, \quad k \in \left[ (i-1) \frac{K}{I} + 1, i \frac{K}{I} \right], \quad (21)$$

где  $\bar{B}_{ck}$  – усреднение по  $k$ , принадлежащему указанному интервалу.

Число уравнений (20) равно  $MN$ , а число уравнений (21) равно  $RSI$ , всего уравнений  $RSI+MN$ , а число неизвестных  $KRS$ . Поэтому, чем больше привлекается спектрозональных снимков (параметр  $I$ ), тем больше уравнений (20, 21) можно составить и тем точнее могут быть восстановлены спектральные характеристики в узлах  $(r, s)$ , не совпадающих с узлами  $(m, n)$ .

Выполнены экспериментальные исследования точности восстановления спектральных характеристик. Для этого во всех узлах частой решетки  $(r, s)$  сопоставлялись спектральные характеристики исходного гиперкуба (см. рис.1) и результата комплексирования в виде изображения  $B_c$  (см. рис.4). В качестве меры близости  $E$  использовалось среднее отношение модуля разности элементов полученного ГСИ  $B_c$  и исходного гиперкуба  $B$ , к уровню яркости элемента на изображении  $B$ :

$$E = \frac{1}{KRS} \sum_{r=1}^R \sum_{s=1}^S \sum_{k=1}^K |B_{krs} - B_{ckrs}| / B_{krs}.$$

При  $K=105$ ,  $\mu = 10$  получены следующие оценки:

- при комплексировании с однозональным (панхроматическим) снимком ( $I = 1$ ):  $E = 0.6624$  %;
- при комплексировании с 3-х зональным снимком ( $I = 3$ ):  $E = 0.4528$  %.

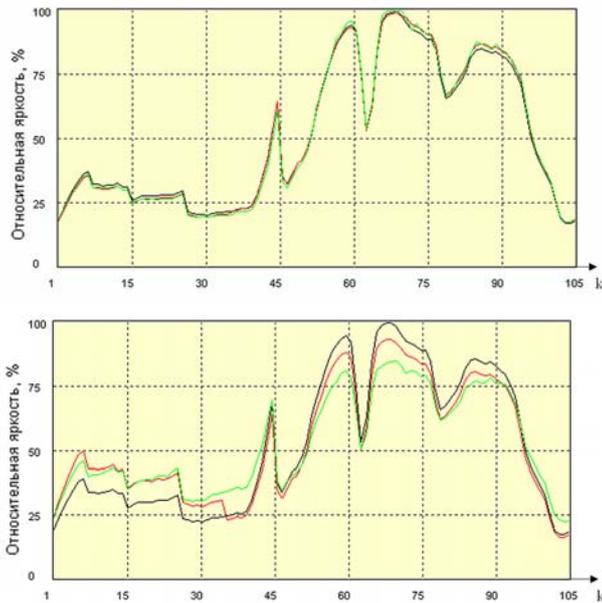
Гистограммы ошибки  $E$  приведены на рис. 5. Малая величина  $E$  обусловлена малым числом отсчетов с большими отклонениями от эталона, поскольку они наблюдаются только на границах объектов, доля которых невелика.



Рис. 5. Гистограмма распределения ошибки  $E$

Проведен анализ зависимости величины ошибки  $E$  от  $\mu$ . При  $\mu = 5$  :  $E = 0,68\%$  ;  $\mu = 10$  :  $E = 0,91\%$  ;  $\mu = 20$  :  $E = 1,16\%$  ;  $\mu = 30$  :  $E = 1,27\%$  .

Для более детального изучения механизма работы алгоритма были построены функции спектральной яркости конкретных точек эталонного изображения  $B$  и результатов обработки  $B_c$  (рис.6): вверху – в узловой точке частой решетки ( $r, s$ ), внизу – в центральной точке, наиболее удаленной от узловых. Как и следовало ожидать, результаты комплексирования с 3-х зональным снимком ближе к эталонным спектральным характеристикам, чем результат обработки по однозональному (панхроматическому) изображению.



- Эталонная спектральная характеристика
- Комплексирование по 3-х каналному снимку
- Комплексирование по панхроматическому снимку

Рис. 6. Спектральные характеристики точек ГСИ

## Выводы

1. Рассмотрены меры сходства элементов гиперспектральных изображений, которые в отличие от традиционных мер, используемых для спектральнозональных и панхроматических изображений, основаны на корреляционном и среднеквадратическом сопоставлении спектральных характеристик различных точек ГСИ.

Экспериментально показано, что использование ГСИ для сегментации объектов позволяет более качественно решить эту задачу.

2. Рассмотрен алгоритм комплексирования ГСИ с целью получения нового изображения, на котором с высокой четкостью отображаются все объекты наблюдаемой сцены. Алгоритм основан на разделении ГСИ на низко- и высокочастотные компоненты и их отдельном комплексировании с учетом степени уникальности точек изображения.

3. Рассмотрен алгоритм комплексирования ГСИ с низким пространственным разрешением с более детальными спектральнозональными изображениями. Предложена методика оценки точности решения этой задачи. Экспериментально получены зависимости точности восстановления спектральных характеристик от соотношения разрешающих способностей. Так, например, при пятикратном отличии разрешающих способностей ГСИ и трехзонального снимков средняя ошибка восстановления спектральной характеристики составила  $E = 0,68\%$  .

Работа проводилась в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы (госконтракт № П2422).

## Литература

1. Злобин В.К., Еремеев В.В.. Обработка аэрокосмических изображений. – М.: Физматлит, 2006. 286 с.
2. 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.

## SPECIFICS OF ANALYSIS AND PROCESSING OF INFORMATION FROM SATELLITE HYPERSPECTRAL EARTH IMAGING SYSTEMS

A number of problems on analysis of hyperspectral images (HSI) of earth surface were examined: measurements of HSI elements similarities, complexing of HSI with images from different imaging systems, HSI object clusterization. Results of research of these algorithms were presented with airborne hyperspectral earth surface images involvement.