

УДК 004.932: 528.831

## ТЕХНОЛОГИИ АНАЛИЗА И ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА КОСМИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

**Еремеев В.В.**, зам. главного конструктора филиала ФГУП «ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс» - ОКБ «Спектр», директор НИИ «Фотон» РГРТУ, д.т.н., e-mail: foton@rsreu.ru

**Князьков П.А.**, аспирант, РГРТУ, НИИ «Фотон», м.н.с., e-mail: foton@rsreu.ru

**Козлов Е.П.**, к.т.н., РГРТУ, НИИ «Фотон», с.н.с., e-mail: foton@rsreu.ru

**Москвитин А.Э.**, к.т.н., РГРТУ, НИИ «Фотон», с.н.с., e-mail: foton@rsreu.ru

**Ключевые слова:** дистанционное зондирование, космические изображения, пространственное разрешение, радиометрическое разрешение, точность координатной привязки, электронные карты, статистический анализ.

**Введение**

Важнейшими техническими характеристиками систем дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) являются их пространственное и радиометрическое разрешение, а также точность координатной привязки объектов наблюдаемой сцены. Оценки этих характеристик, полученные в ходе предполетных калибровок и испытаний систем ДЗЗ, не характеризует в полной мере качество получаемых изображений при их эксплуатации из-за невозможности учета условий съемки и изменений характеристик видеодатчиков [1-2]. В тоже время, как и любой другой информационный продукт, спутниковые изображения должны сопровождаться показателями качества, которые определяют возможность их использования по назначению. В настоящей работе рассматриваются технологии высокоточной оценки указанных выше характеристик на основе статистического анализа получаемых изображений.

Технология оценки пространственного разрешения изображения основана на последовательном выполнении следующих действий. Сначала на изображении отбираются два набора фрагментов  $\Phi_B \in \{\Phi_{Bk}, k = \overline{1, K}\}$  и  $\Phi_G \in \{\Phi_{Gl}, l = \overline{1, L}\}$ , содержащих соответственно вертикально и горизонтально ориентированные контрастные границы однородных по яркости объектов (например, крыши домов на границе с тенью). Поскольку операции обработки фрагментов  $\Phi_B$  и  $\Phi_G$  абсолютно идентичны, то в дальнейшем индексы «В» и «Г» опустим, используя  $\Phi \in \{\Phi_k, k = \overline{1, K}\}$ . Далее формируются аналитические описания границ перепадов яркости  $x \in \{X_k(m), k = \overline{1, K}\}$ , где  $X_k(m)$  - функция границы для  $k$ -го фрагмента,  $m$  - номер строки фрагмента. Затем определяется функция рассеяния края  $G(x)$  в результате комплексирования результатов измерений по множеству фрагментов после предварительного приведения их к единому углу наклона границ и к единым нижнему и верхнему уровням яркости. На заключительном этапе осуществляется кусочно-полиномиальная аппроксимация  $G(x)$ , формирование функции рассея-

Представлены технологии оценки пространственного и радиометрического разрешения, а также точности координатной привязки элементов земной поверхности на космических изображениях. Эти технологии основаны на статистическом анализе объектов наблюдаемой сцены: резких яркостных перепадов, шумовой компоненты изображения, корреляционном совпадении одноименных участков снимков и электронной карты. Приведены результаты экспериментальных исследований точности и надежности решения поставленных задач с привлечением реальных спутниковых изображений.

ния линии как  $F(x) = dG(x)/dx$  и частотно-контрастной характеристики  $T(f) = |\Omega(f)|/|\Omega(0)|$ , где  $\Omega(f) = \mathfrak{F}[F(x)]$ ,  $\mathfrak{F}$  - преобразование Фурье.

Радиометрическое разрешение обычно измеряется отношением сигнал/шум и характеризует меру различимости полезного сигнала на фоне шума. Технология оценки радиометрического разрешения основана на описании шума аддитивной независимой моделью и использовании известного свойства автокорреляционной функции (АКФ):  $\hat{K}_0 = K_0 + D_\varepsilon$ ;  $\hat{K}_\tau = K_\tau$  при  $\tau = 1, 2, \dots$ , где  $\hat{K}_\tau$  и  $K_\tau$  - зашумленные и не зашумленные отсчеты АКФ,  $D_\varepsilon$  - дисперсия шума. Вначале отбираются однородные по яркости фрагменты изображения  $\Phi \in \{\Phi_s, s = \overline{1, S}\}$ . Для каждого столбца отобранных фрагментов вычисляется АКФ. В качестве аналитической модели АКФ в работе обоснован выбор трехпараметрической модели  $K_\tau = a + c\tau^\gamma$ , для которой параметры  $a$  и  $c$  определяются по отсчетам  $\hat{K}_1$  и  $\hat{K}_2$ , а параметр  $\gamma$  - из условия минимизации ошибки оценки  $D_\varepsilon$ .

Технология оценки точности координатной привязки снимков основана на использовании электронных карт (ЭК) и предполагает реализацию трех основных процессов [3]. Во-первых, на заданный регион съемки формируется достаточно точная электронная карта в системе координат изображения. На карте определяется множество информативных опорных фрагментов, имеющих уникальную геометрическую форму и устойчивых во времени. Во-вторых, выполняется поиск координат одноименных точек опорных фрагментов на изображении и карте. Ниже рассматривается полностью автоматический процесс поиска одноименных точек на снимке и карте. Это достигается использованием бинарных масок, которые по яркости и геометрической форме соответствуют аналогичным объектам снимка. В-третьих, на основе координат одноименных точек снимка и карты выполняется оценка качества координатной привязки изображения.

## Оценка пространственной разрешающей способности

**Формирование набора фрагментов.** По реальному изображению формируется набор фрагментов  $\Phi \in \{\Phi_k, k = \overline{1, K}\}$ , например, с вертикально ориентированными границами (рис. 1). Для этих границ величина перепада яркости на местности в горизонтальном направлении должна быть многократно меньше оцениваемой разрешающей способности.

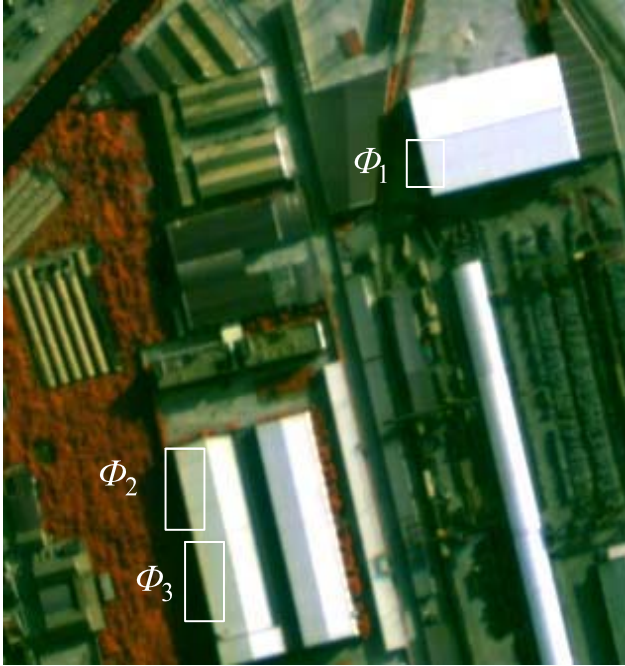


Рис. 1. Набор фрагментов с вертикально ориентированными границами

**Аналитическое описание резких краев.** Для набора фрагментов  $\Phi \in \{\Phi_k, k = \overline{1, K}\}$  находятся аналитические описания резких краев яркости  $x \in \{x_k(m), k = \overline{1, K}\}$ . Для этого сначала в каждой строке определяется пиксель, содержащий резкий край с помощью индикатора яркостного перепада  $\gamma_{kmn} = |B_{kmn}^l - B_{kmn}^r|$ , где  $B_{kmn}^l$  и  $B_{kmn}^r$  - средние значения отсчетов яркости в левой и правой частях скользящей апертуры, имеющей четное число элементов  $2a$ . Положение контура в каждой строке уточняется до долей пикселя как «центр тяжести»:

$$N_{km} = \frac{\sum_{i=i_{km}-a-1}^{i_{km}+a+1} i \gamma_{kmi}}{\sum_{i=i_{km}-a-1}^{i_{km}+a+1} \gamma_{kmi}},$$

где  $i_{km} = \arg \max(\gamma_{kmi})$ . На основе координат  $(m, N_{km})$  по МНК находятся аналитические описания резких краев

$$X_k(m) = \sum_{i=0}^S a_{ki} m^i, \quad k = \overline{1, K}.$$

**Получение функции рассеяния края.** На основе  $x \in \{x_k(m), k = \overline{1, K}\}$  осуществляется восстановление функции рассеяния края (ФРК)  $G_k(x)$  как  $G_k(n - X_k(m)) = \Phi_k(m, n)$ ,  $m = \overline{1, M_k}$ ,  $n = \overline{1, N_k}$ ,  $k = \overline{1, K}$ . Аргументом функции  $G_k(x)$  является расстояние от пикселя фрагмента до перепада по оси  $n$ , а ее значением - яркость этого пикселя. При переходе от одной строки к соседней пиксели приближаются или

удаляются от наклонной границы на субпиксельные расстояния, чем и достигается формирование ФРК с высокой точностью.

Для комплексирования результатов измерений  $G_k(x)$ ,  $k = \overline{1, K}$ , с уровнями яркости  $G_{Лк}$  и  $G_{Пк}$  они приводятся к единым нижнему  $G_{Л}$  и верхнему  $G_{П}$  уровням:

$$\hat{G}_k(x) = \left( \frac{G_{Л} - G_{П}}{G_{Лк} - G_{Пк}} \right) (G_k(x) - G_{Лк}) + G_{Л},$$

$$k = \overline{1, K}, \quad (1)$$

где  $\hat{G}_k(x)$  - скорректированные ФРК.

Кроме этого,  $G_k(x)$ ,  $k = \overline{1, K}$ , необходимо привести к единому углу наклона границы  $\theta = \pi/2$ . Можно показать, что при «наполнении» эллипсоидальной апертуры с полуосями  $a$  и  $b$  на границу, наклоненную к горизонтальной оси под углом  $\theta_k$ , следует изменить масштаб  $\hat{G}_k(x)$  по оси  $x$  в  $\mu_{\theta k} = \sqrt{1 + (b/a)^2 \text{ctg}^2 \theta_k}$  раз (рис 2).

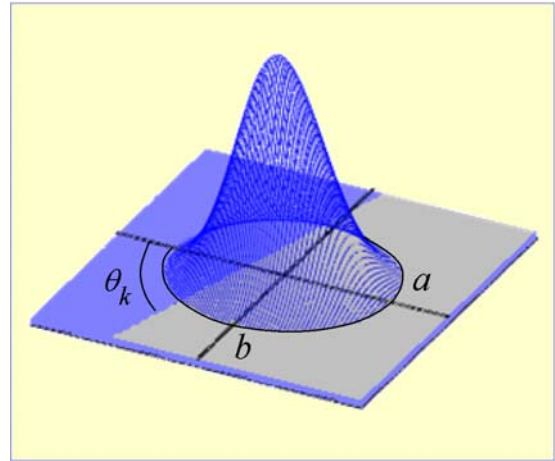


Рис. 2. Учет наклона контура

В результате формируется искомая функция рассеяния края

$$G(x) = \bigcup_{k=1}^K \hat{G}_k(x \mu_{\theta k}),$$

которая содержит измерения от всех фрагментов. На основе полученных с высокой детальностью отсчетов  $G(x)$  последовательно находятся отсчеты функции рассеяния линии (ФРЛ), частотно-контрастной характеристики (ЧКХ) и оценивается линейное разрешение (ЛР) изображения.

**Определение ФРЛ, ЧКХ и ЛР.** Формально ФРЛ  $F(x) = dG(x)/dx$ . В тоже время  $G(x)$  представили выше как набор точек, определенных в общем случае в нерегулярной решетке. Исследованы различные подходы фильтрации измерений, составляющих  $G(x)$  [4]. Установлено, что наилучшие результаты обеспечивает кусочно-полиномиальный подход. В области определения ФРЛ задаются регулярно расположенные узловые точки  $x_0$ , используемые как центральные точки скользящей апертуры с размером  $2a$  (рис. 3). На основе точек  $G(x)$ , попавших в апертуру, по МНК строится полином  $P(x) = p_0 + p_1(x - x_0) + p_2(x - x_0)^2 + p_3(x - x_0)^3$ , коэффициенты которого определяются из условия

$$\sum_i [P(x_i) - G(x_i)]^2 = \min, x_i \in [x_0 - a, x_0 + a].$$

Уточненное значение отсчета ФРК в центральной точке апертуры  $x_0$  определяется коэффициентом  $p_0$ , а отсчет ФРЛ (рис. 4) как

$$F(x_0) = \left| \frac{dP(x)}{dx} \right|_{x=x_0} = p_1.$$

ЧКХ  $T(f)$ , как уже отмечалось, находится путем нормирования модуля частотного представления ФРЛ. Линейное разрешение  $R$  видеоданных определяется полупериодом частоты  $f_{0,5}$ , на которой исходный контраст ЧКХ  $T(f)$  уменьшается наполовину:  $R = 0,5/f_{0,5}$ .

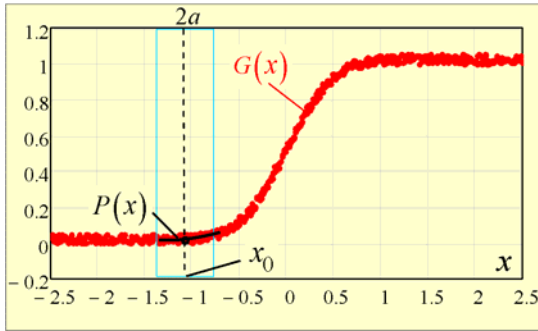


Рис. 3. Кусочно-полиномиальная аппроксимация ФРК

**Аттестация технологии.** Выполнены экспериментальные исследования точности определения аналитического описания контура  $X(m)$  по схеме рис. 4.

Вначале формировалось изображение, содержащее идеальный яркостной перепад с уровнями  $G_L$  и  $G_H$  и координатами  $X_3(m)$ . Этот перепад «размывался» низкочастотным фильтром и в изображение добавлялся аддитивный шум. По рассмотренной выше технологии определялось аналитическое описание границы  $X(m)$  и сопоставлялось с заданным  $X_3(m)$ . По серии снимков установлено, что СКО ошибки нахождения  $X(m)$  не превышает  $10^{-4}$  пикселя.

Выполнены оценки точности определения ФРК, ФРЛ, ЧКХ и ЛР по схеме рис. 5.

Вначале задавались отсчеты эталонной функции рассеяния линии  $F_3(x)$  в виде Гауссоиды. По  $F_3(x)$  на основе известных математических соотношений формировались ФРК  $G_3(x)$ , ЧКХ  $T_3(f)$ , ЛР  $R_3$  и зашумлялись. По рассмотренной выше технологии определялись  $G(x)$ ,  $F(x)$ ,  $T(f)$  и  $R$  и сопоставлялись с эталонными  $G_3(x)$ ,  $F_3(x)$ ,  $T_3(f)$ ,  $R_3$ . Установлено, что СКО ошибки определения ФРК, ФРЛ, ЧКХ и ЛР не превышает 2 % от единицы измерений этих функций при СКО добавляемого шума  $\sigma_{ш} \leq 1$  градации яркости.

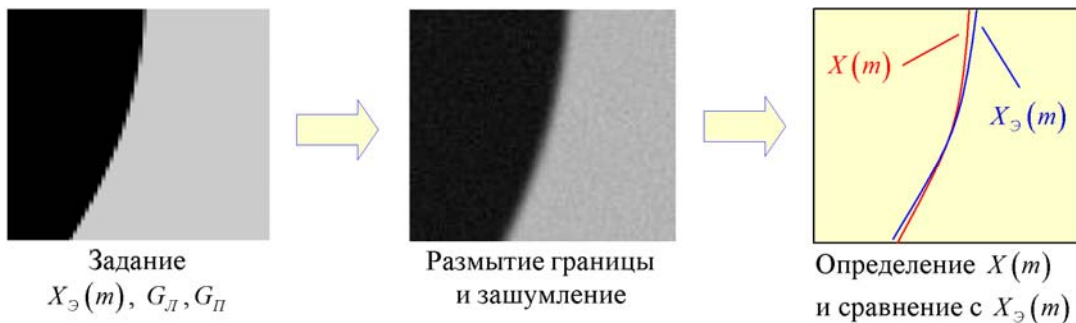


Рис. 4. Схема аттестации процесса определения аналитического описания границ

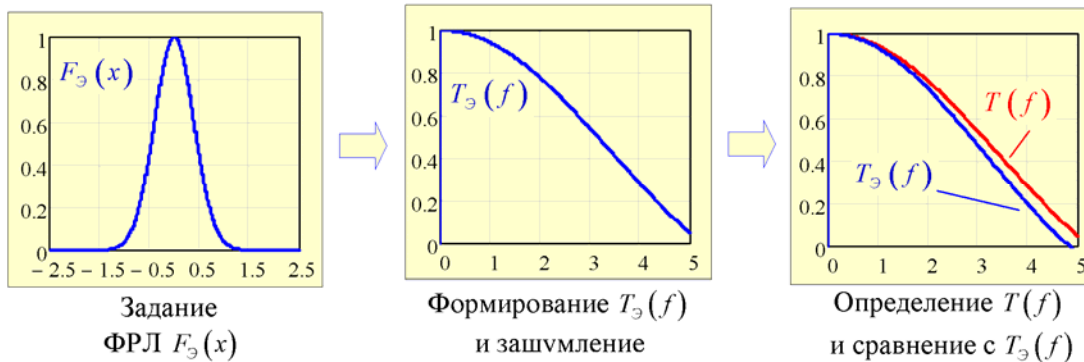


Рис. 5. Схема аттестации процессов определения ФРК, ФРЛ, ЧКХ и ЛР

**Технология оценки радиометрической разрешающей способности**

**Определение параметра модели АКФ.** Для степенной модели АКФ  $K_\tau = a + ct^\gamma$  определим такой параметр  $\gamma$ , при котором достигается наилучшее в некотором смысле согласование модели с статистическими свойствами реального изображения. Выберем на изображении один или несколько однородных по яркости прямоугольных участков, считая, что  $i$ -й столбец,

$i = \overline{1, N}$ , формируется  $i$ -м фотоприемным элементом видеодатчика. Каждый фотоприемный элемент обладает вполне определенными передаточными характеристиками (чувствительностью и темновым сигналом). Полагая, что дисперсия шума  $D_\epsilon$  для выбранного участка неизменна, определим параметр  $\gamma$  из условия:

$$R = \sum_{i=1}^N (\hat{K}_{0i} - a_i - D_\epsilon)^2 = \min, \tag{3}$$

где  $a_i = K_{1i} + (K_{1i} - K_{2i})x$ ,  $x = (2^\gamma - 1)^{-1}$ ,  $K_{1i}$ ,  $K_{2i}$  -

значения АКФ для  $i$ -го столбца изображения при  $\tau = 1, 2$ . Значения  $K_\tau$ , найденные по столбцам изображения, не зависят от параметров линейных передаточных характеристик фотоприемных элементов видеодатчика. Выражение (3) определяет такое значение  $\gamma$ , при котором минимизируется разброс оценок дисперсий шума, найденных для множества столбцов. Искомые параметры  $D_\varepsilon$  и  $x$  определяются из системы

$$dR/dD_\varepsilon = 0, \quad dR/dx = 0. \quad (4)$$

Первое уравнение дает соотношение

$$D_\varepsilon = \overline{\hat{K}_0} - \overline{K_1} - (\overline{K_1} - \overline{K_2})x, \quad (5)$$

где черта над переменными означает операцию усреднения по множеству столбцов. Второе равенство из (4) приводится к виду:

$$\overline{\hat{K}_{0i}K_{1i} - \hat{K}_{0i}K_{2i} - D_\varepsilon(\overline{K_{1i}} - \overline{K_{2i}}) - K_{1i}(K_{1i} - K_{2i}) - (K_{1i} - K_{2i})^2} x = 0 \quad (6)$$

Подставляя (5) в (6), получим  $x$ :

$$x = \frac{\overline{\hat{K}_0}K_1 - \overline{\hat{K}_0}K_2 - (\overline{K_1} - \overline{K_2})(\overline{\hat{K}_0} - \overline{K_1}) - \overline{K_1^2} + \overline{K_1}K_2}{(K_1 - K_2)^2 - (\overline{K_1} - \overline{K_2})^2}. \quad (7)$$

Подставив (7) в (5), найдем  $D_\varepsilon$ . Параметр модели АКФ  $\gamma$  определяется из выражения

$$x = (2^\gamma - 1)^{-1} : \gamma = \frac{1}{\ln 2} \ln \left( 1 - \frac{1}{x} \right).$$

*Оценка дисперсии шума по адаптивной модели АКФ.* Точность оценки дисперсии шума  $D_\varepsilon$  можно повысить, если исходный набор видеоданных определенным образом разбить на  $K$  отдельных групп, найти для каждой  $k$ -й группы оптимальное значение параметра модели АКФ  $\gamma_k$ ,  $k = \overline{1, K}$ , выполнить оценки дисперсий  $D_{\varepsilon k}$  и на основе их определить итоговую  $D_\varepsilon$ . То есть в данном случае модель адаптируется путем изменения параметра  $\gamma_k$ ,  $k = \overline{1, K}$ , для каждой группы в зависимости от ее статистических свойств. Поскольку параметр  $\gamma$  характеризует поведение АКФ, то столбцы исходного набора данных логично упорядочить по мере возрастания  $\gamma_i$ ,  $i = \overline{1, N}$ . После этого упорядоченный набор столбцов разбивается на  $K$  групп, для которых выполняется оценка  $\gamma_k$ ,  $k = \overline{1, K}$ . Для этого вначале определяется оптимальное значение  $\gamma$  для всего набора данных и затем на его основе по критерию (3) для каждого столбца оценивается  $\gamma_i$  как

$$\gamma_i = \frac{1}{\ln 2} \ln \left( \frac{a_i - K_{2i}}{a_i - K_{1i}} \right), \quad i = \overline{1, N}. \quad (8)$$

Упорядоченный набор столбцов разбивается на  $K$  групп так, чтобы диапазоны изменения параметра  $\gamma$  в каждой группе были бы примерно равными.

Параметры модели  $K_{k\tau} = a_k + c_k \tau^{\gamma_k}$  для каждой  $k$ -й группы определяются из условия

$$R = \sum_k \sum_i (\hat{K}_{0ki} - a_{ki})^2 - (\overline{\hat{K}_0} - \overline{a})^2 = \min, \quad (9)$$

где  $a_{ki} = K_{1ki} + (K_{1ki} - K_{2ki})x_k$ ,

$$\overline{a} = \overline{K_1} + \frac{1}{K} \sum_k (\overline{K_{1k}} - \overline{K_{2k}})x_k, \quad x_k = (2^{\gamma_k} - 1)^{-1},$$

$\overline{K_{1k}}$  и  $\overline{K_{2k}}$  - средние значения  $K_{1ki}$  и  $K_{2ki}$  для  $k$ -й группы. По аналогии с (3) условие (9) определяет такие значения параметров  $\gamma_k$ ,  $k = \overline{1, K}$ , при которых минимизируются разбросы оценок дисперсий в каждой из сформированных групп.

Искомые параметры  $x_k$ ,  $k = \overline{1, K}$ , определяются из системы уравнений  $dR/dx_k = 0$ ,  $k = \overline{1, K}$ .

Система приводится к матричной форме

$$\begin{bmatrix} (\alpha_1 S_1 - \beta_1) + \alpha_1 S_2 + \dots + \alpha_1 S_K \\ \alpha_2 S_1 + (\alpha_2 S_2 - \beta_2) + \dots + \alpha_2 S_K \\ \dots \\ \alpha_K S_1 + \alpha_K S_2 + \dots + (\alpha_K S_K - \beta_K) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_K \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \dots \\ \omega_K \end{bmatrix}, \quad (10)$$

где  $\alpha_k = \frac{1}{K} (\overline{K_{1k}} - \overline{K_{2k}})$ ,  $k = \overline{1, K}$ ,

$$S_k = (\overline{K_{1k}} - \overline{K_{2k}}), \quad \beta_k = (\overline{K_{1k}} - \overline{K_{2k}})^2,$$

$$\omega_k = (\overline{\hat{K}_0} - \overline{K_1})(\overline{K_{1k}} - \overline{K_{2k}}) + \overline{K_{1k}^2} - \overline{\hat{K}_{0k}}K_{1k} + \overline{\hat{K}_{0k}}K_{2k} - \overline{K_{1k}}K_{2k}.$$

Определив из (10)  $x_k$ ,  $k = \overline{1, K}$ , оценим дисперсии шума в каждой  $k$ -й группе:

$$D_{\varepsilon k} = \overline{\hat{K}_{0k}} - \overline{K_{1k}} - (\overline{K_{1k}} - \overline{K_{2k}})x_k, \quad (11)$$

и путем их усреднения найдем итоговую оценку  $D_\varepsilon$ .

В рамках произвольной  $k$ -й группы формируется  $D_{\varepsilon k}$  как результат усреднения  $D_{\varepsilon ki}$ ,  $i = \overline{1, N_k}$ , где  $N_k$  - число столбцов в  $k$ -й группе. Поэтому

$$D(D_{\varepsilon k}) = D(D_{\varepsilon ki})/N_k, \quad k = \overline{1, K}.$$

Итоговая оценка  $D_\varepsilon$  определяется как взвешенное среднее

$$D_\varepsilon = \sum_{k=1}^K (N_k/N) D_{\varepsilon k},$$

поэтому дисперсия этой оценки находится как

$$D(D_\varepsilon) = \sum_{k=1}^K (N_k/N)^2 D(D_{\varepsilon k}).$$

*Аттестация технологии.* Оценки дисперсии шума  $D_\varepsilon$  по (5) и (11) являются несмещенными. Действительно, пусть  $a_i$  определено с ошибкой  $\Delta_i$  по отношению к истинному значению  $a_i^*$ , т.е.  $a_i = a_i^* + \Delta_i$ . В этом случае (3) запишется как

$$R = \sum_i \left[ (\hat{K}_{0i} - a_i^*) - D_\varepsilon - \Delta_i \right]^2 = \min.$$

Поскольку  $(\hat{K}_{0i} - a_i^*) = D_\varepsilon$ , то  $R = \sum_i \Delta_i^2$ . Поэтому

$$R = \sum_i \left[ (\Delta_i - \overline{\Delta}) + \overline{\Delta} \right]^2 = \sum_i (\Delta_i - \overline{\Delta})^2 + (\overline{\Delta})^2 = \min.$$

Деля последнее выражение на  $N-1$ , получим  $R = D(\Delta) + (\overline{\Delta})^2 = \min$ . Дисперсия  $D(\Delta)$  не зависит от общего смещения  $\Delta_i$ , поэтому  $R = \min$  при  $\overline{\Delta} = 0$ , что и доказывает несмещенность оценки  $D_\varepsilon$ .

Оценка  $D_\varepsilon$  формируется как среднее значение  $D_{\varepsilon i}$ ,  $i = \overline{1, N}$ . Поэтому ее точность определяется дисперсией  $D(D_\varepsilon)$  и может быть оценена как  $D(D_\varepsilon) = D(D_{\varepsilon i})/N$ , где  $D(D_{\varepsilon i})$  легко оценивается по набору  $D_{\varepsilon i}$ ,  $i = \overline{1, N}$ .

В результате проведения экспериментов на 25 участках с размерами 512x512 элементов значение СКО  $\sigma(D_\varepsilon) = \sqrt{D(D_\varepsilon)}$  не превысило 0,02. Следовательно, эта технология может быть использована для оценки уровня шума, сопоставимого с шумом квантования по яркости, дисперсия которого составляет 1/12.

**Технология оценки точности координатной привязки**

*Формирование опорных фрагментов.* На наблюдаемую сцену из электронной карты отбираются уникальные опорные объекты, соответствующие объектам снимка (рис. 6, слева), в виде изломов береговых линий

и преобразуются из векторного формата в растровый. Степень уникальности опорных фрагментов  $E_i = \{(x_j, y_j); j = \overline{1, J}\}, i = \overline{1, I}$ , определяется среднеквадратичным отклонением  $\sigma_i, i = \overline{1, I}$ , точек береговой линии  $(x_j, y_j), j = \overline{1, J}$ , от прямой  $y = k_i x + b_i$ :

$$\sigma_i^2 = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J [y_j - (b_i + k_i x_j)]^2 + \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J [x_j - (b_i + k_i y_j)]^2, \quad (12)$$

где  $k_i, b_i, i = \overline{1, I}$ , находятся из условий

$$\sum_j (b_i + k_i y_j - x_j)^2 = \min \text{ и } \sum_j (b_i + k_i x_j - y_j)^2 = \min.$$

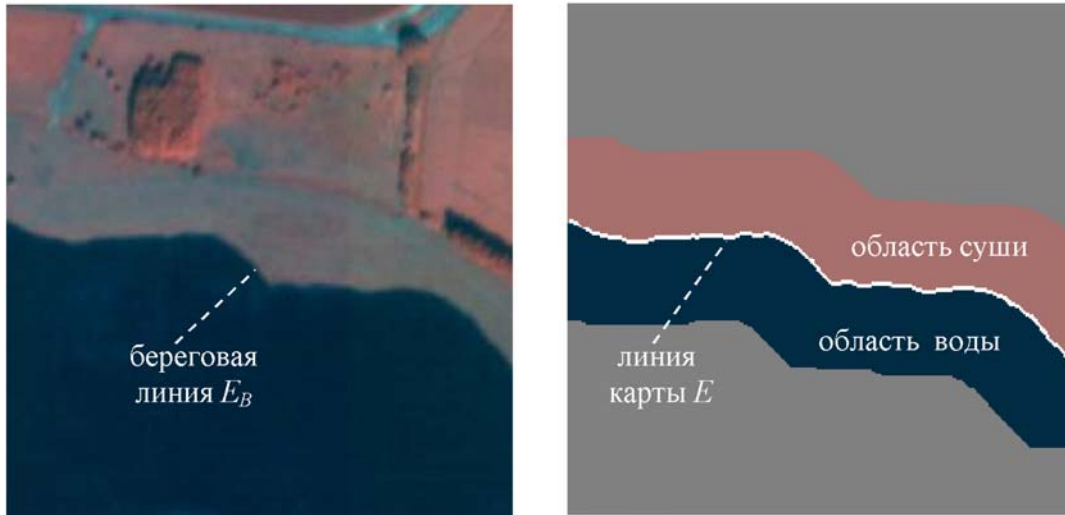


Рис. 6. Уникальный фрагмент снимка (слева) и бинарная маска (справа)

Для каждого опорного фрагмента  $E_i, i = \overline{1, I}$ , формируется бинарная маска  $A_i, i = \overline{1, I}$ . Эта маска содержит две области с различными уровнями яркости, которые разделяются участком линии карты (рис. 6, справа). Затем для этих фрагментов формируются на снимке более расширенные зоны поиска  $B_i, i = \overline{1, I}$  (см. рис. 6, слева).

*Совмещение снимка с картой.* В качестве меры близости фрагментов снимка и карты рассматривается коэффициент корреляции, который с учетом бинарного представления маски сводится к вычислению выражения

$$\rho = \frac{\overline{B_1} - \overline{B_0}}{\sqrt{D_B}} \cdot \frac{\sqrt{q_1 q_0}}{q_1 + q_0}, \quad (13)$$

где  $\overline{B_1}, \overline{B_0}$  и  $q_1, q_0$  - средние значения яркостей снимка и число точек под единичной и нулевой областями маски. В данном случае определение  $\rho$  сводится к подсчету средних яркостей под различными областями маски, чем достигается высокое быстродействие рассматриваемой технологии.

В конечном счете по множеству одноименных точек  $\{(x_i, y_i), (x_i^*, y_i^*); i = \overline{1, I}\}$  определяются полиномы

$$P_x(x_i, y_i) = \sum_{m=0}^p \sum_{n=0}^m a_{n,m-n} x_i^n y_i^{m-n},$$

$$P_y(x_i, y_i) = \sum_{m=0}^p \sum_{n=0}^m b_{n,m-n} x_i^n y_i^{m-n}, \quad i = \overline{1, I}, \quad (14)$$

устанавливающие геометрическое соответствие снимка и карты. Коэффициенты  $a_{n,m-n}$  и  $b_{n,m-n}, m = 0, p, n = 0, m$ , в выражении (14) находятся из условий:

$$\sum_i (P_x(x_i, y_i) - x_i)^2 = \min, \quad \sum_i (P_y(x_i, y_i) - y_i)^2 = \min.$$

При решении рассматриваемой задачи мешающее действие оказывает наличие облаков, теней, движущихся объектов, частично или полностью закрывающих опорные фрагменты (рис. 7, слева и в центре); неполное соответствие геометрии береговой линии на снимке и электронной карте (рис. 7, справа); неравномерное распределение уникальных фрагментов по полю изображения. Рассмотрим ряд конструктивных решений, направленных на нейтрализацию действия этих факторов.

*Устранение систематических ошибок.* Несовпадение береговой линии на снимке и опорном фрагмента (рис. 7, справа) приводит к систематической ошибке. В работе [3] показано, что величина этой ошибки определяется степенью их геометрического сходства, которая описывается выражением:

$$\rho = [1 - (\alpha + \beta)][1 + 2(D_0 + D_1)/(\overline{B_1} - \overline{B_0}) + 2(\alpha - \beta)(D_1 - D_0)/(\overline{B_1} - \overline{B_0})^2 - (\alpha - \beta)^2]^{-0.5}, \quad (15)$$

где  $\alpha$  и  $\beta$  - доля элементов суши под нулевой областью маски и доля элементов водной поверхности под единичной областью («чужие» элементы),  $D_0$  и  $D_1$  - выборочные дисперсии изображения под нулевой и единичной областями бинарной маски.



Рис. 7. Наличие облаков (слева), движущихся объектов и теней (в центре) и несовпадение береговой линии на снимке и карте (справа)

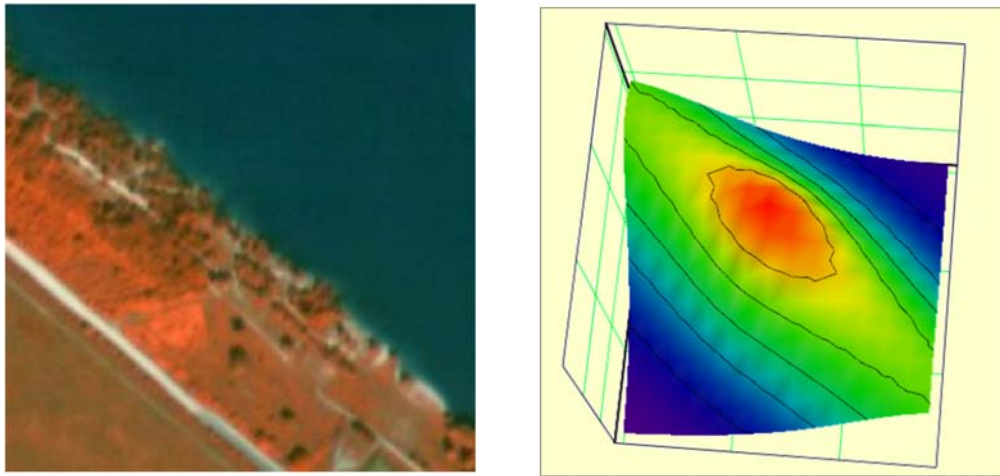


Рис. 8. Фрагмент снимка с линейной береговой линией (слева) и его АКФ (справа)

Из (13) и (15) следует, что коэффициент корреляции зависит от соотношения суммы  $(\alpha + \beta)$  и разности  $(\alpha - \beta)$ , в результате точка наилучшего сходства в общем случае смещается. Для устранения подобного рода систематических ошибок следует использовать асимметричные бинарные маски, в результате чего выражение (15) принимает вид

$$\rho = [1 - \alpha - \beta][\gamma(1 - \gamma)]^{0.5} \times [\pi(1 - \pi) + \pi D_0 / (\bar{B}_1 - \bar{B}_0)^2 + (1 - \pi) D_1 / (\bar{B}_1 - \bar{B}_0)^2]^{-0.5}, \quad (16)$$

где  $\pi = \beta + \gamma(1 - \alpha - \beta)$ ,  $\gamma$  и  $(1 - \gamma)$  – соответственно доля нулевой и единичной областей маски. В этом случае  $\rho$  принимает максимальное значение при

$$\gamma = \left( 1 + \sqrt{\frac{D_0 + \alpha(\bar{B}_1 - \bar{B}_0)^2}{D_1 + \beta(\bar{B}_1 - \bar{B}_0)^2}} \right)^{-1}. \quad (17)$$

Только при полном совпадении  $E$  с  $E_B$ , т.е. при  $\alpha = \beta = 0$ , систематическая ошибка отсутствует. В этом случае равенство  $\rho = \rho_{\max}$  достигается либо путем конструирования несимметричной маски с параметром  $\gamma = \sqrt{D_1} / (\sqrt{D_0} + \sqrt{D_1})$ , либо при равенстве дисперсий  $D_0 = D_1$  для симметричной маски ( $\gamma = 0,5$ ).

**Использование фрагментов с линейными участками.** Для увеличения набора опорных фрагментов выполняется привлечение фрагментов карты, которые содержат почти прямолинейные береговые линии (рис. 8, слева).

Установлено, что изолинии АКФ опорных фрагментов имеют форму, близкую к эллипсу, направления осей  $m$  и  $n$  которого определяются ориентацией береговой линии (рис. 8, справа). Поэтому геометрическое соответствие снимка и карты можно найти из условий:

$$\sum_{i=1}^L (K_{ni} \Delta n_i^2) = \min, \quad \sum_{i=1}^L (K_{mi} \Delta m_i^2) = \min, \quad (18)$$

где  $K_{ni}$  и  $K_{mi}$  – весовые коэффициенты, определяющие различную степень доверия по направлениям  $m$  и  $n$  для  $i$ -го фрагмента,

$$\Delta n_i = [P_x(x_i, y_i) - x_i] \cos \alpha_i - [P_y(x_i, y_i) - y_i] \sin \alpha_i, \\ \Delta m_i = [P_x(x_i, y_i) - x_i] \sin \alpha_i + [P_y(x_i, y_i) - y_i] \cos \alpha_i, \\ \alpha_i - \text{угол между системами координат } xy \text{ и } mn, \quad i = 1, I.$$

Экспериментально установлено, что за счет использования фрагментов с линейными участками береговых линий набор опорных фрагментов расширяется примерно на 30%.

**Отбраковка отдельных участков опорного фрагмента.** Выполнение этой операции основано на многокритериальном анализе наличия мешающих образований и несовпадений снимка и карты на отдельных участках опорного фрагмента. Бинарная маска разбивается на  $L$  участков  $A_i = \{A_i^1, A_i^2, \dots, A_i^L\}$ ,  $i = \overline{1, I}$ . В процессе совмещения  $A_i^l$ ,  $i = \overline{1, I}$ ,  $l = \overline{1, L}$ , с соответствующим участком снимка  $B_i^l$ ,  $i = \overline{1, I}$ ,  $l = \overline{1, L}$ , рассчитываются критерии отбраковки  $K_i$ ,  $i = \overline{1, I}$ . Если участок не удовлетворяет хотя бы одному из критериев  $K_i$ ,

$i = \overline{1, I}$ , то он отбраковывается. На основе (13) с использованием не отбракованных участков рассчитывается коэффициент корреляции:

$$\rho^* = 0.5 \frac{\sum_{j=1}^J (\overline{B}_{1j} - \overline{B}_{0j})}{\sum_{j=1}^J \sqrt{D_{Bj}}} \quad (19)$$

**Аттестация технологии.** Рассогласования координат одноименных точек снимка  $x_{bi}$ ,  $y_{bi}$  и карты  $x_{ei}$ ,  $y_{ei}$  определяются как

$$x_{bi} - x_{ei} = \Delta_{xi} \pm 3\sigma_x, \quad y_{bi} - y_{ei} = \Delta_{yi} \pm 3\sigma_y, \quad i = \overline{1, I}, \quad (20)$$

где  $\Delta_{xi}$ ,  $\Delta_{yi}$  - систематические погрешности привязки по осям  $x$  и  $y$ , а  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$  - СКО случайных погрешностей.

Для определения погрешности технологии координатной привязки вначале координаты карты  $(x_{ei}, y_{ei})$ ,  $i = \overline{1, I}$ , преобразуются по зависимостям (14) в  $(x_{ei}^*, y_{ei}^*)$ , тем самым исключаются систематические ошибки. После этого точность координатной привязки оценивается через СКО  $\sigma = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}$ , где

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{I} \sum_i (x_{bi} - x_{ei}^*)^2}, \quad \sigma_y = \sqrt{\frac{1}{I} \sum_i (y_{bi} - y_{ei}^*)^2} \quad (21)$$

По результатам экспериментальной оценки точности координатной привязки снимков по описанной технологии с использованием изображений от КА «Ресурс-ДК» установлено:

- СКО методической ошибки  $\sigma$  составляет 0.5 пикс.;
- СКО случайной ошибки составляет 0.06 пикс.

## Заключение

Рассмотренные технологии оценки пространственно- и радиометрического разрешения, а также точности координатной привязки объектов изображения экспериментально исследованы с привлечением реальных изображений от КА «Ресурс-ДК», «Метеор-М» и «MeteoSAT-8». По результатам этих исследований можно сделать следующие выводы.

1. Технология оценки пространственного разрешения обеспечивает точность решения этой задачи не хуже 2%. Этот высокий показатель обеспечивается благодаря ряду конструктивных решений:

- высокоточному координатному описанию границы резкого края яркости на основе помехозащищенного индикатора яркостного перепада и алгоритма субпиксельного уточнения координат границ;
- комплексированию результатов измерений по множеству фрагментов, содержащих различные по геометрии и яркости резкие края, на основе приведения их к единому углу ориентации и яркостным уровням;
- высокоточному восстановлению функции рассеяния линии путем кусочно-полиномиальной аппроксимации объединенной функции рассеяния края.

2. Технология оценки радиометрического разрешения обеспечивает измерение СКО шума с точностью порядка 0,2 градации яркости. Такая высокая точность оценки уровня шума обеспечивается благодаря введению адаптивной модели АКФ, адекватно описывающей статистические свойства видеоданных.

3. Технология оценки точности координатной привязки объектов изображений обеспечивает точность решения этой задачи не хуже 0.5 пикселя. Надежность и точ-

ность этой технологии достигается за счет:

- представления опорных фрагментов в виде бинарных масок;
- введения процедуры оценки степени уникальности опорных фрагментов;
- использования алгоритмов учета степени несовпадения одноименных объектов снимка и карты, анализа и учета степени закрытия облаками опорных объектов.

На базе рассмотренных технологий в настоящее время создается комплекс анализа и оценки качества космических изображений земной поверхности, ориентированный на использования информации от вновь проектируемых космических систем ДЗЗ «Ресурс-П», «Электро-Л», «Канопус-В» и др.

Работа проводилась при финансовой поддержке Федерального агентства по науке и инновациям (госконтракт № 02.740.11.0002).

## Литература

1. Rangaswamy M. K. Quickbird II Two-dimensional On-orbit Modulation Transfer Function Analysis Using Convex Mirror Array. South Dakota State University. M.S. thesis. 2003. 149 p.
2. Markham B. The Landsat Sensors' Spatial Responses // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. Vol. GE-23, No. 6, 1985. P.864-875.
3. Егошкин Н.А., Еремеев В.В., Козлов Е.П. Нормализация космических изображений Земли на основе их сопоставления с электронными картами // Цифровая обработка сигналов. 2009. №3. С.21-26.
4. Еремеев В.В., Князьков П.А., Москвитин А.Э. Оценка разрешающей способности аэрокосмических изображений на основе их статистического анализа // Цифровая обработка сигналов. 2009. №3. С.27-30.
5. Зенин В.А., Князьков П.А. Оценка отношения «сигнал/шум» оптико-электронных приборов по изображениям земной поверхности // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Сб. научн. статей. М.: Изд-во Института космических исследований РАН. 2009. Вып. 6. Т. I. С.160-166.

## TECHNOLOGY ANALYSIS AND EVALUATION OF QUALITY OF SPACE IMAGES

*Eremeev V.V., Knyazkov P.A., Kozlov E.P., Moskvitin A.E.*

A technology assessment of the spatial and radiometric resolution and accuracy of the coordinates of the binding elements of the Earth surface on space images. These technologies are based on statistical analysis of the objects observed scene: sharp edges in brightness, the noise component images, the correlation matching of like images sites and e-maps. The experimental results of the accuracy and reliability of the solution of tasks involving real satellite images.

**Keywords:** remote sensing, space images, spatial resolution, radiometric resolution, accuracy of coordinate affixment, statistical analysis.