

СОВРЕМЕННЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАБОТ ПО АНАЛИЗУ И ПОВЫШЕНИЮ КАЧЕСТВА КОСМИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ

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

Ключевые слова: оценка качества изображений, радиометрическая коррекция, геодезическая привязка, комплексирование, устранение смаза на изображении.

Представлены результаты научных исследований НИИ обработки аэрокосмических изображений РГРТУ в области оценки и повышения качества данных дистанционного зондирования Земли, которые получены за последние 5 лет.

Введение

На протяжении многих лет Рязанский государственный радиотехнический университет активно ведет исследования в области создания программно-аппаратных комплексов обработки видеоинформации от систем дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) самого различного целевого назначения. Работы в данном направлении проводятся крупным научным подразделением РГРТУ – НИИ обработки аэрокосмических изображений (НИИ «Фотон»). Заказчиками НИОКР являются известные фирмы ракетно-космической отрасли, которые специализируются в области дистанционных исследований Земли. В рамках Федеральных космических программ России и международных космических проектов коллективом НИИ «Фотон» создано семейство программно-аппаратных комплексов, которые получили эффективное внедрение на российских и зарубежных Центрах приема и обработки данных ДЗЗ.

В настоящей статье не ставится задача по анализу основных результатов деятельности НИИ «Фотон», эту информацию можно получить в работе [1]. Цель статьи – это рассмотрение одного из важных направлений исследований, которое связано с повышением качества материалов космической съемки. По этой тематике сотрудниками НИИ «Фотон» опубликованы десятки научных работ, эти вопросы рассматривались в двух докторских и более чем в 20 кандидатских диссертациях. В данной статье сделана попытка обозначить проблемные вопросы, обобщить полученные результаты, выделить конструктивные элементы в принятых решениях. Более детальные сведения можно получить из цитируемых в статье научных работ. Представленные в статье результаты получены, главным образом, за последние 5 лет.

О качестве космических изображений Земли бессмысленно говорить, не определив его численные показатели. В практике ДЗЗ общепризнано, что наиболее важными показателями качества изображений являются пространственное и радиометрическое разрешение снимков и точность геодезической привязки объектов наблюдаемой сцены. В статье рассматриваются информационные технологии оценки и улучшения этих показателей.

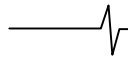
Оценка пространственного разрешения

Известные подходы к решению этой задачи основаны на анализе степени размытия изображений тест-объектов, которые специально создаются на поверхности Земли. Вместо тест-объектов делаются попытки использовать естественные объекты, содержащие резкие границы. Однако отсутствуют технологии, обеспечивающие необходимую точность решения поставленной задачи. Это связано, главным образом, с малой выборкой измерений от анализируемых объектов. В рамках космических проектов «Ресурс-ДК», «Ресурс-П», «Электро-Л», а также проектов создания систем специального назначения, разработана технология, обеспечивающая точность оценки пространственного разрешения порядка 3-4% [2-4]. В самом общем виде операционная схема технологии имеет следующий вид:

$$B \xrightarrow{O} \Phi \xrightarrow{E} X \xrightarrow{U} G \xrightarrow{P} T. \quad (1)$$

Вначале из серии изображений $B \in \{B_i(m, n), i = \overline{1, I}\}$, где $m = \overline{1, M}$ и $n = \overline{1, N}$ – номера строк и столбцов, в автоматизированном режиме с использованием оператора O отбирается множество фрагментов $\Phi \in \{\Phi_k, k = \overline{1, K}\}$, содержащих резкие яркостные перепады.

Далее, с использованием набора операций E для каждого фрагмента осуществляется высокоточное определение границ яркостных перепадов в виде набора функций $X \in \{X_k(m), k = \overline{1, K}\}$. Для этого вначале осуществляется выделение границы в каждой строке фрагмента с помощью индикатора яркостного перепада $\gamma_{kmn} = |B_{kmn}^I - B_{kmn}^{II}|$, где B_{kmn}^I и B_{kmn}^{II} – средние значения отсчетов яркости в левой и правой частях скользящей апертуры, имеющей четное число элементов $2h$. Далее положение контура уточняется до долей пикселя как «центр тяжести»: $N_{km} = \frac{\sum_{i=i_{km}-h-1}^{i_{km}+h+1} i \gamma_{kmi}}{\sum_{i=i_{km}-h-1}^{i_{km}+h+1} \gamma_{kmi}}$, где $i_{km} = \arg \max_n(\gamma_{kmi})$. На основе координат (m, N_{km}) по МНК находятся аналитические описания резких перепа-



дов $X \in \{X_k(m), k = \overline{1, K}\}$ как $X_k(m) = \sum_{i=0}^S a_{ki} m^i$. Все эти меры позволили описать границы яркостного перепада с точностью 10^{-2} пикселя.

С помощью набора операций U для всех фрагментов определяются функции рассеяния края (ФРК) и выполняется их объединение. Для произвольного k -го фрагмента ФРК находится как $G_k((n - X_k(m)) \cos \theta_k) = \Phi_k(m, n)$, где θ_k – угол наклона границы. Аргументом функции $G_k(x)$ является расстояние от пикселя до яркостного перепада, а ее значением – яркость этого пикселя. При переходе от одной строки к соседней элементы изображения приближаются или удаляются от наклонной границы на субпиксельные расстояния, чем и достигается формирование ФРК с высокой детальностью. Далее измерения ФРК от всего набора фрагментов преобразуются к единым нижнему $G_{\text{Л}}$ и верхнему $G_{\text{П}}$

$$\text{уровням яркости: } \hat{G}_k(x) = \frac{G_{\text{Л}} - G_{\text{П}}}{G_{\text{Лк}} - G_{\text{Пк}}} (G_k(x) - G_{\text{Лк}}) + G_{\text{Л}}$$

После чего $\hat{G}_k(x)$, $k = \overline{1, K}$, приводятся к единому углу границы ($\pi/2$) путем изменения масштаба по оси x в $\mu_{\theta_k} = \sqrt{1 + (b_3/a_3)^2} \text{ctg } \theta_k$ раз, где a_3 и b_3 – полуоси эллипсоидальной апертуры видеодатчика. После этого процедура объединения всех измерений в единую ФРК

$$G(x) = \bigcup_{k=1}^K \hat{G}_k(x \mu_{\theta_k}) \text{ является корректной.}$$

Частотно-контрастная характеристика (ЧКХ) $T(v)$ с учетом уровня шума на изображении и светосигнальной функции определяет пространственную разрешающую способность. ЧКХ находится с помощью набора операций P . Вначале выполняется кусочно-кубическая аппроксимация отсчетов $G(x)$ в виде $P(x) = p_0 + p_1(x - x_0) + p_2(x - x_0)^2 + p_3(x - x_0)^3$ из условия $\sum_i [P(x_i) - G(x_i)]^2 = \min$, $x_i \in [x_0 - a, x_0 + a]$, где x_0 и $2a$ – центр и размер скользящей апертуры. После этого находится функция рассеяния линии как $F(x_0) = |dP(x)/dx|_{x=x_0} = p_1$. Искомая частотно-контрастная характеристика определяется выражением $T(v) = |\Omega(v)| / |\Omega(0)|$, где $\Omega(v) = \mathfrak{F}[F(x)]$, \mathfrak{F} – преобразование Фурье.

Высокая точность решения рассматриваемой задачи достигнута благодаря объединению измерений по десяткам и сотням перепадам яркости и помехозащищенному высокоточному определению координатных описаний границ.

Оценка отношения сигнал/шум

Центральной задачей здесь является высокоточное измерение непосредственно по изображению уровня шума, например его дисперсии. Известные решения этой задачи основаны на анализе однородных по ярко-

сти участков изображений. Поскольку абсолютно однородные участки не встречаются, то изменение сюжетной составляющей приписывается к действию шума, и возникает достаточно большая методическая ошибка. В работе [5] показано, что при вполне определенных допущениях для однородных фрагментов шум может быть описан аддитивной независимой моделью. В этом случае дисперсия шума оценивается как разность измеренного нулевого отсчета автокорреляционной функции (АКФ) и нулевого отсчета, полученного на основе экстраполяции по соседним отсчетам, которые не подвержены действию шума. Точность такой оценки полностью определяется адекватностью используемой при экстраполяции модели АКФ.

В работах [5,6] выдвинута идея адаптивной модели АКФ $K_{ii} = a_i + c_i^\gamma$, в которой a_i и c_i находятся из условия прохождения функции через отсчеты K_{1i} и K_{2i} , а параметр γ из условия:

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

где $a_i = K_{1i} + (K_{1i} - K_{2i})x$, $x = 1/(2^\gamma - 1)$. Выражение (2) определяет такое значение γ , при котором минимизируется разброс оценок дисперсий шума, найденных по отдельным наборам. Из системы $dR/dD_\varepsilon = 0$, $dR/dx = 0$ определяется

$$D_\varepsilon = \overline{K}_0 - \overline{K}_1 - (\overline{K}_1 - \overline{K}_2)x, \quad (3)$$

где

$$x = \frac{\overline{K}_0 \overline{K}_1 - \overline{K}_0 \overline{K}_2 - (\overline{K}_1 - \overline{K}_2)(\overline{K}_0 - \overline{K}_1) - \overline{K}_1^2 - \overline{K}_1 \overline{K}_2}{(\overline{K}_1 - \overline{K}_2)^2 - (\overline{K}_1 - \overline{K}_2)^2}. \quad (4)$$

Здесь черта над переменными означает операцию усреднения по множеству наборов. Параметр модели АКФ γ определяется из выражения $x = (2^\gamma - 1)^{-1}$ как $\gamma = \frac{1}{\ln 2} \ln(1 + 1/x)$. Найденное таким образом значение параметра γ является оптимальным в смысле критерия (2) для анализируемого набора видеоданных, т.е. модель АКФ наилучшим образом адаптируется к статистическим свойствам изображения.

Рассмотренный подход получил развитие в виде групповой адаптивной модели, что позволило значительно повысить точность оценки дисперсии шума D_ε . В данном случае оптимальное значение γ определяется для всего набора данных и затем по критерию (2) для каждого i -го набора оценивается γ_i как

$$\gamma_i = \frac{1}{\ln 2} \ln \left(\frac{a_i - K_{2i}}{a_i - K_{1i}} \right), \quad i = \overline{1, N}. \quad (5)$$

После этого наборы данных упорядочиваются по мере возрастания γ_i . Полученный таким образом упорядоченный набор разбивается на K групп так, чтобы объем данных в каждой группе был примерно одинаковым. Параметры модели $K_{k\tau} = a_k + c_k \tau^{\gamma_k}$ для каждой k -й группы находятся из условия

$$R = \sum_k \sum_i (K_{0ki} - a_{ki})^2 - (\bar{K}_0 - \bar{a})^2 = \min, \quad (6)$$

где $a_{ki} = K_{1ki} + (K_{1ki} - K_{2ki})x_k$, $\bar{a} = \bar{K}_1 + \frac{1}{K} \sum_K (\bar{K}_{1k} - \bar{K}_{2k})x_k$,

$x_k = (2^k - 1)^{-1}$, \bar{K}_{1k} и \bar{K}_{2k} – средние значения K_{1ki} и K_{2ki} для k -й группы. По аналогии с (2) условие (6) определяет такие значения параметров γ_k , $k = \bar{1}, \bar{K}$, при которых минимизируются разбросы оценок дисперсий в каждой из сформированных групп. Искомые параметры x_k , $k = \bar{1}, \bar{K}$, определяются из системы уравнений $dR/dx_k = 0$, $k = \bar{1}, \bar{K}$, которая приводится к матричной форме:

$$\begin{bmatrix} (\alpha_1 S_1 - \beta_1) + \alpha_1 S_2 + \dots + \alpha_1 S_K \\ \alpha_2 S_1 + (\alpha_2 S_2 - \beta_2) + \dots + \alpha_2 S_K \\ \dots \\ \alpha_K S_1 + \alpha_K S_2 + \dots + (\alpha_K S_K - \beta_K) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_K \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \dots \\ \omega_K \end{bmatrix}, \quad (7)$$

где $S_k = (\bar{K}_{1k} - \bar{K}_{2k})$, $\alpha_k = S_k / K$, $\beta_k = (K_{1k} - K_{2k})^2$,

$$\omega_k = (\bar{K}_0 - \bar{K}_1)(\bar{K}_{1k} - \bar{K}_{2k}) + \bar{K}_{1k}^2 - \bar{K}_{0k} \bar{K}_{1k} + \bar{K}_{0k} \bar{K}_{2k} - \bar{K}_{1k} \bar{K}_{2k}, \quad k = \bar{1}, \bar{K}.$$

После определения из (7) x_k , $k = \bar{1}, \bar{K}$, оцениваются дисперсии шума в каждой k -й группе $D_{ek} = \bar{K}_{0k} - \bar{K}_{1k} - (\bar{K}_{1k} - \bar{K}_{2k})x_k$, и итоговая оценка

$$D_\varepsilon = \sum_{k=1}^K (N_k / N) D_{ek}. \quad (8)$$

Выполнены экспериментальные исследования алгоритма, основанного на групповой адаптивной модели АКФ, с привлечением снимков от космического аппарата «Ресурс-ДК». В результате установлено, что этот алгоритм позволяет выполнить оценку дисперсии шума с точностью порядка 0,03.

Высокоточная геодезическая привязка снимков

Использование навигационной информации не обеспечивает необходимой точности геодезической привязки объектов наблюдаемой сцены. Возникает необходимость решения этой задачи с привлечением опорных точек местности. В качестве их могут выступать береговые линии морей, озер, островов, рек, дорожные сети и другие объекты. Расположение опорных объектов устойчиво во времени и они достаточно полно представлены в соответствующих электронных картах. В рамках геостационарной космической системы наблюдения Земли «Электро-Л» разработана полностью автоматическая технология геодезической привязки по опорным наземным ориентирам [7-11]. Общая схема решения этой задачи может быть представлена следующим образом:

$$\begin{aligned} E &\Rightarrow A_i \Rightarrow \ominus \Rightarrow O \Rightarrow O^* \Rightarrow P. \\ B &\Rightarrow B_i \Rightarrow \Rightarrow \end{aligned} \quad (9)$$

Вначале из карты E формируется множество уни-

кальных опорных объектов в виде бинарных масок (рис. 1) A_i , $i = \bar{1}, \bar{I}$, которые соответствуют по яркости и геометрической форме аналогичным объектам снимка B . На рис. 1 приведен пример участка береговой линии и бинарной маски. Для каждой маски A_i , $i = \bar{1}, \bar{I}$, формируются зоны поиска B_i , $i = \bar{1}, \bar{I}$, в виде фрагментов изображения B . Далее выполняется совмещение бинарных масок с одноименными объектами снимка, в результате чего формируется множество одноименных точек снимка и карты $O = \{(x_i, y_i), (x_i^*, y_i^*); i = \bar{1}, \bar{I}\}$. На основе анализа множества O осуществляется отбраковка ложно идентифицированных точек с помощью набора критериев K . Оставшиеся точки образуют множество O^* , по которому с помощью МНК (операция M) устанавливается геометрическое соответствие снимка и карты в виде двумерных полиномов P .

С учетом бинарного представления маски A вычисление коэффициента корреляции

$$\rho = (\overline{BA} - \overline{B}\overline{A}) / \sqrt{D_B D_A} \quad (10)$$

сводится к подсчету средних значений яркостей снимка \overline{B}_1 , \overline{B}_0 и числу точек q_1 , q_0 под единичной и нулевой областями маски:

$$\rho = [(\overline{B}_1 - \overline{B}_0) / \sqrt{D_B}] \cdot [\sqrt{q_1 q_0} / (q_1 + q_0)]. \quad (11)$$

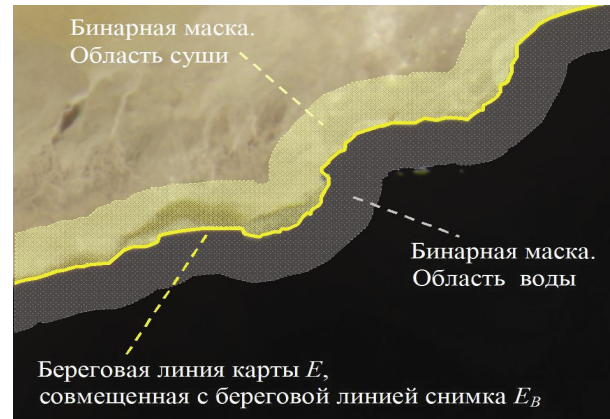


Рис. 1. Бинарная маска, совмещенная с уникальным фрагментом снимка

Фрагменты электронной карты E абсолютно точно не совпадают с соответствующими береговыми линиями на снимках E_B , что приводит к ошибкам оценки координат точки наилучшего совмещения E с E_B . В работе [9] показано, что изменение ρ в этом случае описывается выражением:

$$\rho = \frac{1 - (\alpha + \beta)}{\sqrt{1 + 2 \frac{D_0 + D_1}{B_1 - B_0} + 2(\alpha - \beta) \frac{D_1 - D_0}{(B_1 - B_0)^2} - (\alpha - \beta)^2}}, \quad (12)$$

где α и β – доля элементов суши и воды под нулевой и единичной областями маски, D_0 и D_1 – дисперсии снимка под нулевой и единичной областями маски.

Значение ρ зависит как от доли «чужих» элементов $(\alpha + \beta)$, так и от соотношения между α и β , в результате точка наилучшего сходства смещается. Для устранения этого явления предложено использовать асим-

метричные бинарные маски, для которых (12) преобразуется к виду:

$$\rho = \frac{(1 - \alpha - \beta) \sqrt{q_0 q_1 / (q_0 + q_1)^2}}{\sqrt{\pi (1 - \pi) + \frac{\pi D_0}{(\bar{B}_1 - \bar{B}_0)^2} + \frac{(1 - \pi) D_1}{(\bar{B}_1 - \bar{B}_0)^2}}}, \quad (13)$$

где $\pi = \beta + q_0(1 - \alpha - \beta) / (q_0 + q_1)$.

В случае неполного совпадения карты E с береговой линией снимка E_B максимальное значение ρ достигается построением ассиметричной маски с параметрами $q_0 = (q_0 + q_1) / (1 + \sqrt{\theta_0 / \theta_1})$, где $\theta_0 = D_0 + \alpha(\bar{B}_1 - \bar{B}_0)^2$, $\theta_1 = D_1 + \beta(\bar{B}_1 - \bar{B}_0)^2$. При полном совпадении E с E_B ($\alpha = \beta = 0$) ошибка отсутствует и $\rho = \rho_{\max}$ при ассиметричной маске с $q_0 = (q_0 + q_1) \sqrt{D_1} / (\sqrt{D_0} + \sqrt{D_1})$, либо для симметричной маски ($q_0 = q_1$) при равенстве дисперсий $D_0 = D_1$. Для повышения точности и надежности совмещения элементов снимка и карты разработан ряд критериев отбраковки фрагментов [9, 12].

Оценка точности геодезической привязки объектов выполняется по опорным точкам на снимке B и карте E : $(x_{bi}, y_{bi}), (x_{ei}, y_{ei}), i = \overline{1, I}$, в виде СКО:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{I} \sum_{i=1}^I ((x_{bi} - x_{ei})^2 + (y_{bi} - y_{ei})^2)}. \quad (14)$$

По реальным изображениям со спутника «Электро-Л» установлено, что СКО привязки объектов по рассмотренной технологии не превышает 0.6 пикселя, это достигается за счет использования бинарных масок и критериев отбраковки измерений, не внушающих доверия.

Комплексирование разноспектральных изображений

При дистанционных наблюдениях Земли широко используются системы мультиспектральной съемки. На разноспектральных изображениях объекты наблюдаемой сцены отображаются совершенно по-разному. Естественным образом возникает задача формирования по мультиспектральному изображению (МСИ) панхроматического или трехзонального (в виде RGB-компонент) изображений, на которых все объекты отображаются с высокой четкостью. Такая постановка вопроса имеет аналитическое обоснование. Действительно, степень отличия двух точек МСИ B_{1w} и $B_{2w}, w = \overline{1, W}$, полученных в W спектральных диапазонах, можно определить как $\frac{1}{W} \sum_{w=1}^W (B_{1w} - B_{2w})^2$.

На панхроматическом снимке отличие одноименных точек $B_1 = \frac{1}{W} \sum_{w=1}^W B_{1w}$ и $B_2 = \frac{1}{W} \sum_{w=1}^W B_{2w}$ определим как $(B_1 - B_2)^2$. В результате эффект от комплексирования МСИ можно оценить показателем

$$\gamma = W \sum_{w=1}^W (B_{1w} - B_{2w})^2 / \left[\sum_{w=1}^W (B_{1w} - B_{2w}) \right]^2, \quad (15)$$

который всегда $\gamma \geq 1$.

В работе [13] предложены алгоритмы решения рассматриваемой задачи. Результат комплексирования по одному из алгоритмов, основанном на отдельной обработке высокочастотных и низкочастотных компонент изображения с выделением уникальных отсчетов, представлен на рис. 2: вверху – панхроматический снимок, полученный как $B = \frac{1}{W} \sum_{w=1}^W B_w$, внизу – результат комплексирования.



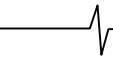
Рис. 2. Комплексирование мультиспектральных изображений

Часто в системах ДЗЗ осуществляется одновременная мультиспектральная и панхроматическая съемка одного и того же участка земной поверхности. При этом МСИ характеризуются высоким спектральным разрешением, но многократно более низким по отношению к панхроматическому изображению пространственным разрешением. Стоит задача получения МСИ с высоким и спектральным, и пространственным разрешением.

Рассмотрим алгоритм решения этой задачи [13]. Пусть на одну и ту же сцену получены МСИ $B \in \{B_w(m, n), w = \overline{1, W}\}$ и панхроматическое изображение $D \in \{D(r, s)\}$, при этом периоды повторения узлов (m, n) и (r, s) значительно отличаются, т.е. $R/M \gg 1, S/N \gg 1$. Сформируем новое изображение

$$B_w^*(r, s) = \frac{D(r, s) \cdot B_w(r, s)}{DB_w} \cdot \bar{B}_w, \quad i = 1 + \text{ent}\left(w \frac{I}{W}\right), \quad (16)$$

где $B_w^*(r, s)$ – w -я компонента результирующего МСИ



$$B^* \in \{B_w^*(r,s), w = \overline{1,W}\}, \quad \overline{DBk} = \frac{1}{RS} \sum_{r=1}^R \sum_{s=1}^S D(r,s) B_w(r,s),$$

$$\overline{B_w} = \frac{1}{MN} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N B_w(m,n), \quad B_w(r,s) = \Phi(B_w(m,n)) - w\text{-я}$$

компонента МСИ, восстановленная в узлах частой решетки (r,s) некоторым оператором Φ .

Экспериментально установлено, что сформированное в узлах частой решетки изображение $B_w^*(r,s)$ приближается по пространственному разрешению к D , а по спектральному – к $B \in \{B_w(m,n), w = \overline{1,W}\}$. Результат решения этой задачи представлен на рис. 3.

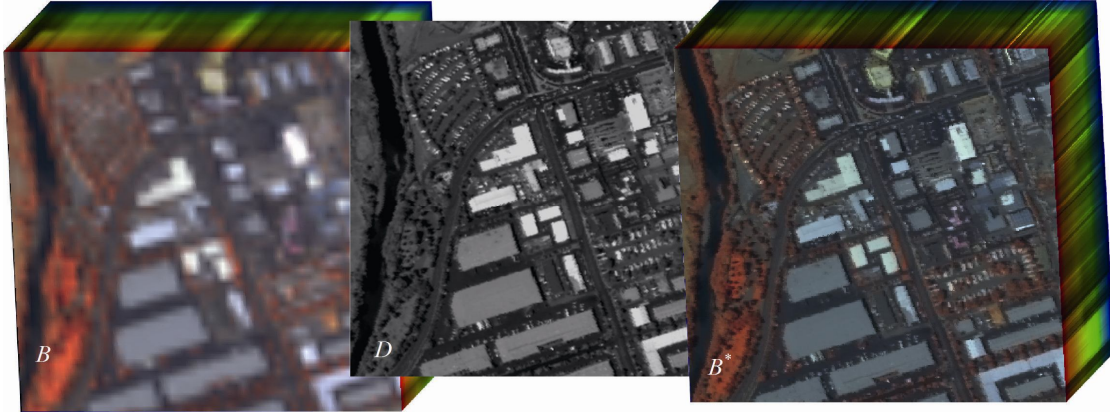


Рис. 3. Комплексование МСИ с панхроматическим снимком

Еще одной важной задачей является получение по МСИ изображения в естественных цветах. Модель формирования отсчетов изображения в очень узком w -м спектральном диапазоне в первом приближении с точностью до постоянного множителя можно представить как $B_w(m,n) = G_w(m,n)S_w(m)$, где $G_w(m,n)$ – полезный сигнал, а $S_w(m)$ – коэффициент пропускания атмосферы. Сформируем новое изображение, в котором отсутствуют искажения атмосферы:

$$B_w^*(m,n) = \frac{B_w(m,n)}{B_w(m)}, \quad \overline{B_w} = \frac{G_w(m,n)}{G_w(m)} \cdot \overline{B_w}, \quad (17)$$

где $\overline{B_w(m)}$ и $\overline{G_w(m)}$ – средние значения отсчетов изображений $B_w(m,n)$ и $G_w(m,n)$ по m -му столбцу, $\overline{B_w}$ – средняя яркость изображения $B_w(m,n)$. Устранив искажающее действие атмосферы, можно из $B_w^*(m,n)$, $w = \overline{1,W}$, сформировать RGB-компоненты для отображения сцены в естественных цветах. На рис. 4 представлен пример решения этой задачи.

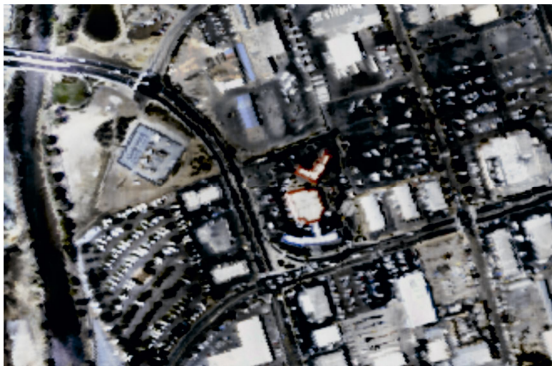


Рис. 4. Изображение в естественных цветах

Коррекция структурных искажений

В современных системах ДЗЗ широко используются видеодатчики на основе приборов с зарядовой связью: ПЗС-линеек и ПЗС-матриц. В ходе эксплуатации и даже

в процессе формирования изображения сотни и тысячи фотоприемных элементов, входящих в эти датчики, изменяют свои передаточные характеристики. Традиционные калибровочные и статистические методы не обеспечивают необходимого качества коррекции возникающих структурных искажений.

В работах [14-18] предложены подходы к высококачественному восстановлению видеоинформации в условиях ее статистической неоднородности и изменения передаточных характеристик фотоприемных элементов в процессе получения изображений. Эти подходы основаны на введении времязависимых аддитивной, мультипликативной и аддитивно-мультипликативной моделей. Коэффициенты корректирующих полиномов $K_m(n)$ и $C_m(n)$ для более общей аддитивно-мультипликативной модели находятся из условия:

$$\sum_{n=1}^N \sum_{i=-S}^S [B(m,n) \cdot K_m(n) + C_m(n) - B(m,n+i)]^2 = \min. \quad (18)$$

Это условие приводит к системе нелинейных уравнений относительно искомым коэффициентов, а при $K_m(n) = 1$ или $C_m(n) = 0$ – к системам линейных уравнений. Здесь предполагается, что m -й столбец изображения формируется m -м фотоприемным элементом видеодатчика. Выполнены исследования упомянутых моделей на натурной информации от различных систем ДЗЗ. Установлено, что наилучшее качество коррекции времязависимых структурных искажений обеспечивает аддитивная полиномиальная модель.

Установлено также, что для некоторых типов датчиков при формировании достаточно протяженных изображений (при большом N) требуется использование корректирующих полиномов высоких степеней, что ведет к потере качества восстановления изображений. В связи с этим на основе (18) разработана кусочно-линейная модель, которая предполагает адаптивное разбиение изображения на фрагменты, содержащие вполне определенное число строк, и использование в пределах каж-

дого фрагмента модели (18).

На базе рассмотренных подходов разработан ряд программных комплексов коррекции времязависимых структурных искажений. На рис. 5 представлен пример решения рассмотренной задачи.

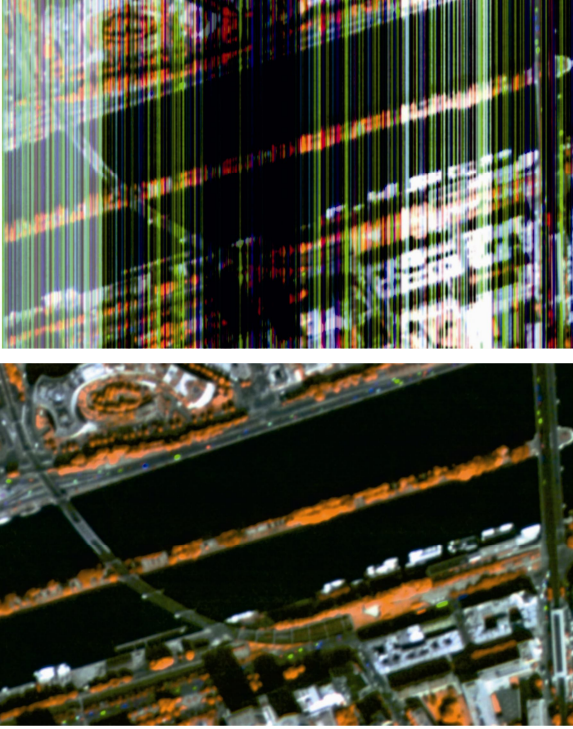


Рис. 5. Коррекция структурных искажений

Устранение смаза изображений

В современных системах ДЗЗ широко используются ПЗС-матрицы, работающие в режиме накопления видеосигнала. В этом случае частота опроса ПЗС-линеек, входящих в матрицу, должна быть строго согласована со скоростью «бега» изображения в фокальной плоскости видеодатчика. В противном случае возникает смаз изображения, который необходимо устранить в процессе обработки данных ДЗЗ.

Явление смаза можно описать в виде [19] $r = F r'$, где r и r' – смазанное и идеальное дискретные изображения, F – дискретный линейный оператор. Последний можно определить как $F = D f D^{-1}$, где D и D^{-1} – соответственно операторы дискретизации и восстановления изображения по отчетам, f – непрерывный оператор свертки изображения в виде набора дельта-функций $f(x) = \sum_{n=1}^N \delta(x - n \Delta)$, где Δ – смещение,

характеризующее ошибку рассогласования скорости полета спутника и периода опроса ПЗС-матрицы.

Будем считать, что известны Δ , f и F . Необходимо с использованием этих параметров выполнить наиболее качественное устранение смаза, т.е. восстановление r' по r . Эта задача более просто решается в спектральной области. Оптимальное решение в смысле среднеквадратической близости исходного и восстановленного сигналов при некоррелированном шуме дает

фильтр Винера:

$$r'(\omega) = V(\omega) r(\omega), \quad (19)$$

$$V(\omega) = \tilde{F}(\omega) / \left[|F(\omega)|^2 + E(\omega) \right], \quad (20)$$

где $r'(\omega)$, $r(\omega)$, $F(\omega)$ – соответствующие спектры Фурье, $E(\omega)$ – отношение спектральной плотности мощности шума и изображения. На практике точно оценить $E(\omega)$ трудно, поэтому в качестве $E(\omega)$ выступает величина, которая подбирается оператором, исходя из наилучшего качества скорректированного изображения.

При использовании фильтра Винера для коррекции смаза возникают характерные искажения в виде «теней» от объектов на расстояниях, кратных величине смаза λ . Для уменьшения «теней» (ценой увеличения общей среднеквадратической ошибки) предлагается модифицировать фильтр (20) так, чтобы при сохранении общей огибающей (20) иметь возможность регулировать добротность фильтра вблизи нулей функции $F(\omega)$:

$$V'(\omega) = \frac{\tilde{F}(\omega)}{|F(\omega)|^2 + \theta E(\omega)} \frac{|O(\omega)|^2 + \theta E(\omega)}{|O(\omega)|^2 + E(\omega)}, \quad (21)$$

где $O(\omega)$ – огибающая функции $F(\omega)$, θ – настраиваемый оператором параметр.

Исследовался также и алгебраический подход к коррекции смаза на основе записи обратного к F рекурсивного фильтра [19]. На реальных космических изображениях установлено, что этот подход дает несколько худшие результаты. В тоже время характерные для него вычислительные процедуры просты и наглядны, они позволяют многократно повысить скорость решения рассматриваемой задачи.

Выполнены экспериментальные исследования [19, 20] с привлечением изображений от космического аппарата «Ресурс-ДК», в которых наблюдались сильные смазы (до 100 и более пикселей) из-за неправильного задания частоты опроса ПЗС-матриц. На рис. 6 в качестве примера представлены смазанное изображение и обработанное.

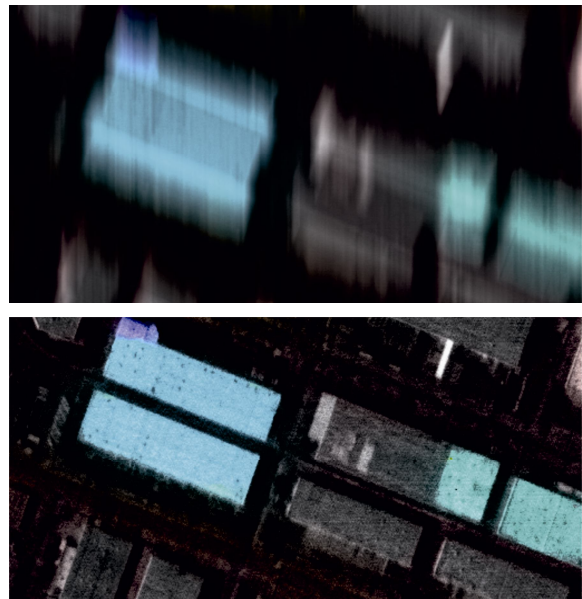


Рис. 6. Коррекция смаза изображения

Заключение

Рассмотренные технологии оценки и повышения качества материалов космической съемки апробированы в рамках космических систем ДЗЗ «Ресурс-ДК», «Монитор-Э», «Метеор-М», «Электро-Л», а также систем специального назначения.

На базе предложенных решений создан ряд программных комплексов, которые вошли в состав систем обработки данных ДЗЗ NormScan, NormSatReg, NoaaSat, GlobalSat, OrthoPlan, OrthoNormScan, MonitorSat, MeteorSat, PlanetaMeteo, ElektroSat и др. В настоящее время они используются для обработки видеoinформации, поступающей от российских спутников ДЗЗ «Ресурс-ДК», «Метеор-М» и от зарубежных систем MeteorSat, Terra, Aqua, Noaa. Дальнейшее развитие рассмотренных решений осуществляется в рамках вновь проектируемых систем ДЗЗ «Ресурс-П», «Канопус-В», модификаций систем «Метеор-М» и «Электро-Л».

Литература

1. Злобин В.К., Еремеев В.В. Обработка аэрокосмических изображений. М.: Физматлит. 2006. 288 с.
2. Еремеев В.В., Князьков П.А. Оценка разрешающей способности материалов космической съемки на основе их статистического анализа // Современные проблемы ДЗЗ из космоса: М.: Институт космических исследований РАН, 2010. Вып.7. Том 2. С. 26-34.
3. Еремеев В.В., Князьков П.А., Козлов Е.П., Москвитин А.Э. // Технологии анализа и оценки качества космических изображений // Цифровая обработка сигналов. 2010. № 3. С. 30-37.
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 ДЗЗ из космоса: М.: Институт космических исследований РАН, 2009. Вып. 6. Том I. С. 160-166.
6. Еремеев В.В., Князьков П.А. Оценка уровня аддитивного шума на аэрокосмических изображениях поверхности Земли // Вестник РГРТУ. Рязань, 2010. № 2. С. 8-11.
7. Еремеев В.В., Козлов Е.П. Технология уточнения геодезической привязки изображений, полученных с геостационарных спутников, с использованием электронных карт // Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий. М.: Физматлит, 2008. С. 244-247.
8. Еремеев В.В., Козлов Е.П. Автоматическая координатная привязка изображений от геостационарных космических систем наблюдений Земли по электронным картам // Вестник РГРТУ. Рязань, 2008. №23. С. 14-20.
9. Еремеев В.В., Козлов Е.П. Повышение точности и надежности координатной привязки снимков от геостационарных космических систем наблюдений Земли по электронным картам // Вестник РГРТУ. Рязань, 2009. №28. С. 6-12.
10. 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. 14-21.
11. Егошкин Н.А., Еремеев В.В., Козлов Е.П., Москвитин А.Э., Москвитин И.В., Москвитин А.Э. Геодезическая привязка изображений от геостационарных спутников по контуру диска Земли и электронным картам // Современные проблемы ДЗЗ из космоса: М.: Институт космических исследований РАН, 2009. Вып. 6. Том. I. С. 62-66.
12. Еремеев В.В., Егошкин Н.А., Зенин В.А. и др. Нормализация изображений от геостационарной космической системы наблюдения Земли // Цифровая обработка сигналов. 2011. №3. С. 11-16.
13. Антонюшкина С.В., Еремеев В.В., Макаренко А.А. и др. Особенности анализа и обработки информации от систем гиперспектральной съемки земной поверхности // Цифровая обработка сигналов. 2010. № 4. С. 38-45.
14. Еремеев В.В., Зенин В.А., Князьков П.А. Статистическая оценка степени зашумленности космических изображений земной поверхности // Вестник РГРТУ. Рязань, 2008. №24. С. 3-7.
15. Еремеев В.В., Зенин В.А. Радиометрическая нормализация изображений от многоматричных сканирующих устройств // Цифровая обработка сигналов. 2009. №3. С. 31-35.
16. Еремеев В.В., Зенин В.А. Статистические модели коррекции структурных искажений на спутниковых изображениях земной поверхности // Цифровая обработка сигналов. 2010. №3. С. 30-36.
17. Зенин В.А., Кузнецов А.Е., Побаруев В.И. Алгоритм радиометрической коррекции изображений с неоднородным сюжетом, полученных от космического аппарата «Ресурс-ДК» // Вестник РГРТУ. Рязань, 2008. № 23. С. 43-48.
18. Еремеев В.В., Зенин В.А. Модели коррекции динамических структурных искажений на космических изображениях // Вестник РГРТУ. Рязань, 2010. № 33. С. 3-7.
19. Еремеев В.В., Егошкин Н.А. Коррекция смаза изображений в системах космического наблюдения Земли // Цифровая обработка сигналов. 2010. №4. С. 28-33.
20. Шебалин Ю.Г., Кузнецов А.Е., Кузнецов П.К. Программа по устранению смаза информации дистанционного зондирования Земли. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011616007 от 03.08.2001г.

ACTUAL FIELDS OF WORK ON ANALYSIS AND INCREASING QUALITY OF SPACE IMAGERY OF EARTH SURFACE

Eremeev V.V.

Scientific research results acquired within last 5 years by SRI of aerospace imagery processing of RSREU in field of evaluation and increasing quality of Earth remote sensing data, were presented.