

УДК 004.932

МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ КОМПЛЕКСИРОВАНИЯ СПЕКТРОЗОНАЛЬНОЙ ВИДЕОИНФОРМАЦИИ ОТ СИСТЕМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

В.К. Злобин, В.В. Еремеев, А.Э. Москвитин

Введение

Современные системы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) широко используют метод одновременной съемки земной поверхности в нескольких спектральных диапазонах. Это достигается обычно путем использования набора линеек приборов с зарядовой связью (ПЗС-линеек) в специальных конструкциях сканирующих устройств. ПЗС-линейки располагаются в фокальной плоскости датчика в поперечном направлении относительно направления полета спутника. Формирование изображения каждой ПЗС-линейкой в строчном направлении осуществляется за счет ее периодического опроса, а в кадровом направлении – за счет равномерного движения спутника. В настоящей работе рассматриваются решения ряда типовых задач комплексирования разноспектральной видеоинформации, которые направлены на повышение полосы обзора, разрешающей способности и дешифрируемости материалов космической съемки.

1-я задача. С целью многократного повышения полосы обзора сканирующих устройств в фокальной плоскости в строчном направлении с небольшим перекрытием устанавливаются ПЗС-линейки, число которых может достигать нескольких десятков (рис. 1, а). Ставится задача осуществить прецизионное геометрическое и яркостное совмещение фрагментов изображений, формируемых различными ПЗС-линейками, с учетом их взаимного расположения и степени перекрытия полей зрения. По существу, задача сводится к получению математической модели виртуального датчика, имеющего одну линейку с многократно увеличенной полосой обзора.

2-я задача. В другой конструкции сканирующих устройств ПЗС-линейки располагаются друг за другом в кадровом направлении и с субпиксельным смещением в строчном направлении (рис. 1, б). В результате земная поверхность сканируется в более частой решетке пространственной дискретизации и тем самым обеспечивается повышение разрешающей способности съемки. Ставится задача формирования изображения в более частой решетке пространственной дискретизации путем объединения видеоданных от нескольких субпиксельно

Предлагаются несколько подходов к построению технологий комплексирования спектральнональных изображений земной поверхности, позволяющих повысить разрешающую способность, полосу обзора и дешифрируемость материалов космической съемки. Рассматриваются методы решения типовых задач комплексирования разноспектральной информации, которые остро ставят практика дистанционного зондирования Земли.

смещенных ПЗС-линеек (см. рис. 1, б). Здесь необходимо построить математическую модель виртуального датчика, который имеет полосу обзора одной ПЗС-линейки с многократно увеличенным числом фотоприемников.

3-я задача. Повышение разрешающей способности космической съемки, как правило, сопровождается сужением полосы обзора. Чтобы создать детальную космическую карту на заданный регион, необходимо получить серию разновременных перекрывающихся снимков, сформированных на различных витках полета спутника. Поэтому практически востребована задача прецизионного геометрического и яркостного совмещения серии перекрывающихся разновременных изображений. В отличие от 1-й задачи здесь речь идет о совмещении изображений, полученных с различной степенью перекрытия, при различных параметрах орбиты, углах ориентации спутника и условиях наблюдения (освещенности, погодных условий и т.п.).

4-я задача. При спектральнональной съемке в различных спектральных диапазонах формируется серия изображений, на которых одноименные объекты сцены отображаются совершенно по-разному. Стоит задача комплексирования нескольких изображений, одновременно полученных датчиком в различных спектральных диапазонах, с целью формирования нового изображения, в котором с высокой четкостью объединяются все объекты, присутствующие на исходных спектральнональных снимках. В данном случае не требуется создания нового более совершенного сканирующего устройства, а повышение качества отображения объектов наблюдаемой сцены достигается за счет специальной математической обработки разноспектральной информации и ее объединения.

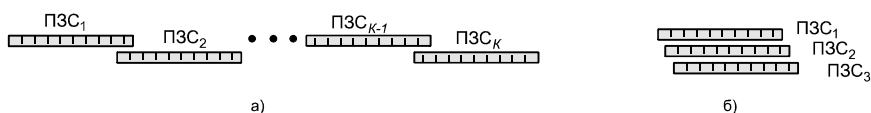


Рис. 1. Два способа размещения ПЗС-линеек в фокальной плоскости датчика



5-я задача. С целью повышения разрешающей способности съемки и получения информации о спектральном составе излучения от наблюдаемых объектов во многих системах ДЗЗ используется режим одновременной панхроматической и спектрально-анализирующей съемки. При этом панхроматические снимки обладают многократно лучшим разрешением, чем спектрально-анализирующие. В данном случае важной задачей является формирование спектрально-анализирующего изображения высокого пространственного разрешения путем совместной обработки панхроматического (черно-белого) снимка высокого разрешения и спектрально-анализирующих снимков той же сцены, но полученных с многократно худшим разрешением.

Ниже рассматриваются методы и технологии решения этих задач.

Комплексирование синхронно формируемых перекрывающихся изображений

Опишем изображения, формируемые в режиме синхронной съемки, в виде функций изменения яркости

$$B_k(m_k, n_k), \quad k = \overline{1, K}, \quad m_k = \overline{1, M}, \quad n_k = \overline{1, N},$$

где k - номер изображения, K - число ПЗС-линейек. Эти изображения регистрируются в различных системах координат (m_k, n_k) и имеют небольшие перекрытия по координатам m_k , а ряды четных и нечетных ПЗС-линейек смещены в кадровом направлении. Необходимо на основе объединения $B_k(m_k, n_k)$, $k = \overline{1, K}$, сформировать в заданной картографической проекции изображение $D(x, y)$, $x = \overline{1, X}$, $y = \overline{1, Y}$, соответствующее случаю съемки некоторым виртуальным датчиком с многократно расширенной полосой обзора. Из-за неточности измерения параметров юстировки датчиков и смещения их полей зрения в общих областях имеются взаимные нелинейные геометрические искажения. Поэтому для получения общего изображения, охватывающего суммарную область наблюдения всех датчиков, необходимо устранить общие и относительные геометрические искажения, присущие сканерной съемке. Возможно несколько вариантов нахождения функций геометрического соответствия совмещаемых изображений на основе определения координат одноименных точек (ОИТ) в областях перекрытия. В работе [1] показано, что наилучший результат достигается, когда на основе ОИТ уточняются параметры взаимного расположения ПЗС-линейек, которые остаются неизменными как для области перекрытия, так и для всего изображения. Эти параметры выступают в качестве входных данных для функций геометрического совмещения. Поэтому такой подход позволяет не только повысить точность совмещения, но и объединить процедуры геометрического комплексирования изображений и их преобразования в единую картографическую проекцию.

Пусть: $t = S_t(m, n)$ - функция опроса ПЗС-линейек; $\mathbf{r} = \mathbf{S}_r(t)$ - функция сканирования точки (вектор, соединяющий спутник со сканируемой точкой); $\boldsymbol{\eta} = \mathbf{S}_\eta(t)$ - закон движения спутника, описывающий изменение положения вектора, соединяющего центр Земли со спутником; $\mathbf{R} = \mathbf{S}_R(\mathbf{r}, \boldsymbol{\eta})$ - функция изменения вектора, соединяющего центр Земли со сканируемой точкой; $\lambda = S_\lambda(\mathbf{R})$, $\varphi = S_\varphi(\mathbf{R})$ - функции преобразования коор-

динат сканируемой точки в геодезические координаты λ , φ (широта и долгота); $x = S_x(\lambda, \varphi)$, $y = S_y(\lambda, \varphi)$ - функции преобразования геодезических координат в картографические x , y . В этом случае процесс преобразования $(m_k, n_k) \rightarrow (\lambda, \varphi)$ можно описать парой функций F_λ, F_φ :

$$\begin{aligned} \lambda &= F_\lambda(m_k, n_k; \boldsymbol{\psi}_k, \boldsymbol{\theta}_k), \\ \varphi &= F_\varphi(m_k, n_k; \boldsymbol{\psi}_k, \boldsymbol{\theta}_k), \quad k = \overline{1, K}, \end{aligned} \quad (1)$$

где $\boldsymbol{\psi}_k = (\alpha_{yk}, \omega_{yk}, \chi_{yk})$ - вектор установочных углов k -й ПЗС-линейки; $\boldsymbol{\theta}_k = (\alpha_k, \omega_k, \chi_k)$ - вектор углов ориентации спутника. Поскольку ОИТ формируются двумя ПЗС-линейками в разное время (с интервалом Δt_k), то в общем случае $\boldsymbol{\theta}_k \neq \boldsymbol{\theta}_{k+1}$.

Аналогично выражениям (1) можно определить функции преобразования изображений $B_k(m_k, n_k)$, $k = \overline{1, K}$, в единую картографическую систему координат:

$$\begin{aligned} x &= F(m_k, n_k; \boldsymbol{\psi}_k, \boldsymbol{\theta}_k), \\ y &= G(m_k, n_k; \boldsymbol{\psi}_k, \boldsymbol{\theta}_k), \quad k = \overline{1, K}. \end{aligned} \quad (2)$$

В процессе геометрического трансформирования элементы совмещаемых изображений $B_k(m_k, n_k)$ и $B_{k+1}(m_{k+1}, n_{k+1})$ проектируются в плоскость xOy в виде двух объединяющихся множеств D_k и D_{k+1} , элементы которых составляют часть суммарного изображения $D(x, y)$:

$$D(x, y) = \begin{cases} B_k[f_k(x, y), g_k(x, y)], & (x, y) \in D_k; \\ B_{k+1}[f_{k+1}(x, y), g_{k+1}(x, y)], & (x, y) \in D_{k+1}, (x, y) \notin D_k, \end{cases}$$

где $f_k(x, y) = m_k$, $g_k(x, y) = n_k$ - функции обратного координатного соответствия $(x, y) \rightarrow (m_k, n_k)$, $v \in \{k, k+1\}$. Эти функции, также как и прямые (2), отличаются только входными данными:

$$m_k = f(x, y; \boldsymbol{\psi}_k, \boldsymbol{\theta}_k), \quad n_k = g(x, y; \boldsymbol{\psi}_k, \boldsymbol{\theta}_k)$$

для любого $k \in \{1, 2, 3, \dots, K\}$.

Примем изображение $B_k(m_k, n_k)$ в качестве базового, а $B_{k+1}(m_{k+1}, n_{k+1})$ - в качестве присоединяемого (корректируемого). Тогда для отображения $B_k(m_k, n_k)$ и $B_{k+1}(m_{k+1}, n_{k+1})$ в плоскость формируемого суммарного изображения $D(x, y)$ необходимо определить соответствие между координатами (m_k, n_k) и (m_{k+1}, n_{k+1}) одноименных точек в виде некоторых функций F_m, F_n :

$$m_{k+1} = F_m(m_k, n_k), \quad n_{k+1} = F_n(m_k, n_k). \quad (3)$$

Это соответствие может быть установлено на основе (1) по схеме

$$(m_k, n_k) \xrightarrow{F_\varphi, F_\lambda} (\varphi, \lambda) \xrightarrow{F_\varphi^{-1}, F_\lambda^{-1}} (m_{k+1}, n_{k+1}),$$

где F_φ, F_λ в качестве аргументов используют $\boldsymbol{\psi}_k, \boldsymbol{\theta}_k$, а входными параметрами для обратных функций $F_\varphi^{-1}, F_\lambda^{-1}$ служат $\boldsymbol{\psi}_{k+1}, \boldsymbol{\theta}_{k+1}$. При этом в общем случае $\boldsymbol{\psi}_k \neq \boldsymbol{\psi}_{k+1}$, $\boldsymbol{\theta}_k \neq \boldsymbol{\theta}_{k+1}$. Определив для заданной точки (m_k, n_k) ее геодезические координаты (λ, φ) , положение одноименной точки (m_{k+1}, n_{k+1}) можно найти путем итерационного решения системы уравнений:

$$\begin{cases} \varphi = F_{\varphi} (m_{k+1}^{(v)}, n_{k+1}^{(v)}) + F'_{\varphi m} \Delta m_{k+1}^{(v+1)} + F'_{\varphi n} \Delta n_{k+1}^{(v+1)}, \\ \lambda = F_{\lambda} (m_{k+1}^{(v)}, n_{k+1}^{(v)}) + F'_{\lambda m} \Delta m_{k+1}^{(v+1)} + F'_{\lambda n} \Delta n_{k+1}^{(v+1)}, \end{cases} \quad (4)$$

где v - номер шага итерационного процесса; $F'_{\varphi m}$, $F'_{\varphi n}$, $F'_{\lambda m}$, $F'_{\lambda n}$ - производные по m и n в точке $(m_{k+1}^{(v)}, n_{k+1}^{(v)})$; $\Delta m_{k+1}^{(v+1)}$, $\Delta n_{k+1}^{(v+1)}$ - поправки на v -м шаге к искомым координатам

$$m_{k+1} = m_{k+1}^{(v)} + \Delta m_{k+1}^{(v+1)}, \quad n_{k+1} = n_{k+1}^{(v)} + \Delta n_{k+1}^{(v+1)}.$$

Центральным вопросом при комплексировании данных синхронной съемки является уточнение ψ_k и θ_k на основе множества

$$O_k = \{(m_{kj}, n_{kj}), (m_{k+1,j}, n_{k+1,j}); j = \overline{1, J}\}.$$

Зная закон опроса датчика и множество O_k , $k = 1, K-1$, не трудно получить временной интервал O_{k2} между съемкой j -й точки, после чего найти функцию $F_d = (F_{dx}, F_{dy}, F_{dz})$ для пересчета элементов множества O_k в орбитальную динамическую систему координат (ОДСК) $X_d Y_d Z_d$:

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_{kj}(t) &= (X_{dkj}, Y_{dkj}, Z_{dkj}) = F_d(m_{kj}, n_{kj}; \eta, \theta_k, \psi_k), \\ \mathbf{R}_{k+1,j}(t + \Delta t_{kj}) &= (X_{d,k+1,j}, Y_{d,k+1,j}, Z_{d,k+1,j}) = \\ &= F_d(m_{k+1,j}, n_{k+1,j}; \eta, \theta_{k+1}, \psi_{k+1}, \Delta t_{kj}). \end{aligned}$$

После этого получим

$$\Delta \mathbf{R}_{ij} = (\Delta X_{dkj}, \Delta Y_{dkj}, \Delta Z_{dkj}) = \mathbf{R}_{kj}(t) - \mathbf{R}_{k+1,j}(t + \Delta t_{kj}). \quad (5)$$

Далее будем считать, что не изменяющиеся компоненты вектора ψ_k входят в θ_k в виде постоянных составляющих. Определим для произвольной пары изображений $B_k(m_k, n_k)$, $B_{k+1}(m_{k+1}, n_{k+1})$ вектор поправок $\Delta \theta = (\Delta \alpha, \Delta \omega, \Delta \chi)$, где для простоты индекс k опущен. С учетом малости компонент вектора $\Delta \theta$ составим для каждой j -й пары одноименных точек систему уравнений

$$\begin{cases} \Delta X_{dj} = \frac{\partial F_{dx}(\Delta \theta)}{\partial \alpha} \Delta \alpha_{vн} + \frac{\partial F_{dx}(\Delta \theta)}{\partial \omega} \Delta \omega_{vн} + \frac{\partial F_{dx}(\Delta \theta)}{\partial \chi} \Delta \chi_{vн}, \\ \Delta Y_{dj} = \frac{\partial F_{dy}(\Delta \theta)}{\partial \alpha} \Delta \alpha_{vн} + \frac{\partial F_{dy}(\Delta \theta)}{\partial \omega} \Delta \omega_{vн} + \frac{\partial F_{dy}(\Delta \theta)}{\partial \chi} \Delta \chi_{vн}, \\ \Delta Z_{dj} = \frac{\partial F_{dz}(\Delta \theta)}{\partial \alpha} \Delta \alpha_{vн} + \frac{\partial F_{dz}(\Delta \theta)}{\partial \omega} \Delta \omega_{vн} + \frac{\partial F_{dz}(\Delta \theta)}{\partial \chi} \Delta \chi_{vн}, \end{cases} \quad (6)$$

где $\Delta \theta_v = (\Delta \alpha_v, \Delta \omega_v, \Delta \chi_v)$ - вектор поправок, найденных на v -й итерации.

Полученная система уравнений является слабо обусловленной относительно зависимости ΔZ_{dj} от $\Delta \theta$. Поэтому для нахождения $\Delta \theta$ поступим следующим образом. Найдем вначале поправку $\Delta \chi_v$, учитывая тот факт, что ОИТ в перекрывающейся части разнесены на значительные расстояния вдоль оси X_d и соответствующей оси исходного изображения n_k ; напротив, вдоль оси Y_d (и соответствующей ей оси m_k) координаты ОИТ изменяются незначительно. Поэтому относительный разворот столбцов изображений $B_k(m_k, n_k)$, $B_{k+1}(m_{k+1}, n_{k+1})$ проявляется при сопоставлении пар одноименных точек, значительно

отличающихся по координате X_d . С учетом этого замечания разобьем множество одноименных точек O_k на два подмножества

$$O_{k1} = \{(m_{kj}, n_{kj}), (m_{k+1,j}, n_{k+1,j}); j = \overline{1, J_1}\},$$

$$O_{k2} = \{(m_{kj'}, n_{kj'}), (m_{k+1,j'}, n_{k+1,j'}); j' = \overline{1, J_2}\},$$

включив в O_{k1} и O_{k2} ОИТ, расположенные соответственно в верхней и нижней частях перекрывающейся области. Выполнив пересчет элементов подмножеств O_{k1} и O_{k2} в ОДСК, получим новые подмножества

$$O_{k1}^* = \{(Y_{dkj}, X_{dkj}), (Y_{d,k+1,j}, X_{d,k+1,j}); j = \overline{1, J_1}\},$$

$$O_{k2}^* = \{(Y_{dkj'}, X_{dkj'}), (Y_{d,k+1,j'}, X_{d,k+1,j'}); j' = \overline{1, J_2}\},$$

на основе которых найдем

$$\Delta \chi_{jj'} = \arctg \frac{a_{kj} - a_{k+1,j}}{1 + a_{kj} a_{k+1,j}}, \quad (7)$$

$$\text{где } a_{kj} = \frac{Y_{dkj} - Y_{dkj'}}{X_{dkj} - X_{dkj'}},$$

$$a_{k+1,j} = \frac{Y_{d,k+1,j} - Y_{d,k+1,j'}}{X_{d,k+1,j} - X_{d,k+1,j'}}.$$

Искомую поправку к углу поворота $\Delta \chi$ найдем в результате осреднения $\Delta \chi_{jj'}$ по множеству одноименных точек с номерами j и j' . Подставим $\Delta \chi$ в первые два уравнения системы (6), определим $\Delta \alpha_j$ и $\Delta \omega_j$, и в результате осреднения получим $\Delta \alpha$ и $\Delta \omega$.

Передаточные характеристики ПЗС-линеек могут значительно отличаться, что проявляется в изменении средней яркости на границах совмещения. Рассмотрим процедуру яркостного выравнивания совмещаемых изображений. Если изображение $B_k(m_k, n_k)$ принять за базовое, а $B_{k+1}(m_{k+1}, n_{k+1})$ - за корректируемое, то после описания процесса их геометрического объединения в виде развернутых выражений (2) можно определить область перекрытия P_i , которая включает множество одноименных точек $Q_k = \{b_k(m, n), b_{k+1}(m, n); (m, n) \in P_k\}$, зафиксированных в единой системе координат. Поскольку при сопоставлении яркостей $b_k(m, n)$ и $b_{k+1}(m, n)$ значения координат (m, n) не играют никакой роли, то пронумеруем одноименные точки в области перекрытия некоторым индексом $j = \overline{1, J}$:

$$Q_k = \{b_{kj}, b_{k+1,j}; j = \overline{1, J}\}, \quad k = \overline{1, K-1}.$$

Яркостное выравнивание изображений можно выполнить по критерию совпадения эмпирических функций распределения [2]. Пусть $F_k(b_k)$, $k = \overline{1, K}$, - функции распределения, построенные по видеоданным перекрывающихся частей, т.е. по множествам Q_k , $k = \overline{1, K}$. Тогда функция приведения яркости $(k+1)$ -го изображения к k -у определяется из условия

$$F_{k+1}(b_{k+1}) = F_{k1}(b_{k+1}^*)$$

$$\text{как } b_{k+1}^* = F_k^{-1}(F_{k+1}(b_{k+1})) = \varphi_{k+1,k}(b_{k+1}).$$

Нетрудно понять, что процесс последовательного фотометрического выравнивания, начиная со второго и до k -го изображения, описывается функциональным преобразованием вида

$$b_k^* = \varphi_{21}(\varphi_{32}(\dots \varphi_{k,k-1}(b_k)\dots)), \quad k = \overline{2, K}. \quad (8)$$

Комплексирование изображений от субпиксельно смещенных ПЗС-линеек

Технология комплексирования субпиксельно смещенных изображений основана на строгом аналитическом описании этого процесса. Для простоты понимания ограничимся вначале наиболее простым случаем комплексирования данных от двух ПЗС-линеек, смещенных относительно друг друга на 0.5 шага дискретизации и имеющих по M элементов (рис. 2).

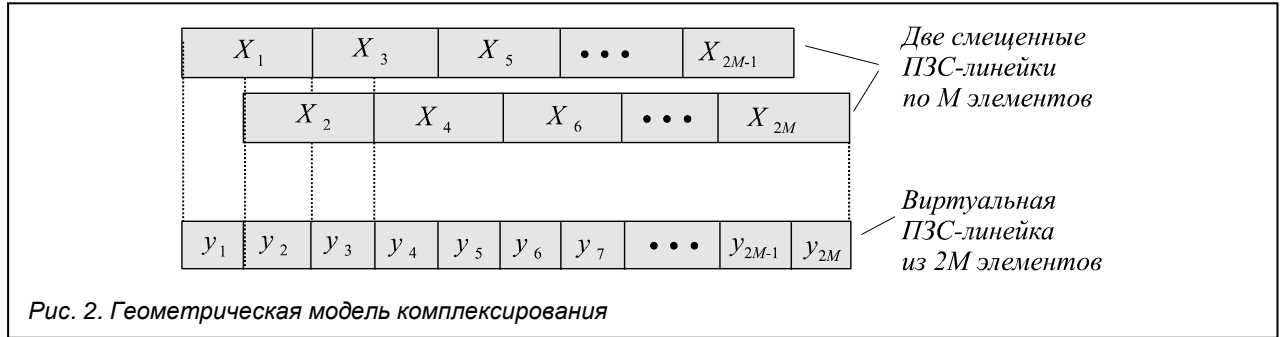


Рис. 2. Геометрическая модель комплексирования

На приведенном рисунке: $X_1, X_2, X_3, \dots, X_{2M}$ - отсчеты яркости двух строк изображения, полученных от двух смещенных ПЗС-линеек: $X_1, X_3, X_5, X_7, \dots, X_{2M-1}$ - отсчеты от 1-й линейки; $X_2, X_4, X_6, X_8, \dots, X_{2M}$ - отсчеты от 2-й линейки; $y_1, y_2, y_3, \dots, y_{2M}$ - отсчеты яркости строки изображения, полученной от одной виртуальной ПЗС-линейки с двойным числом элементов. Из рис. 2 следует, что отсчеты X_m и y_m , $m = \overline{1, 2M}$, связаны между собой как

$$y_1 = X_1,$$

$$y_m = 2 \sum_{i=0}^{m-3} (-1)^i X_{m-1-i} + (-1)^m X_1, \quad m = \overline{2, 2M}. \quad (9)$$

Неопределенность по поводу выбора значения начального элемента легко снимается. Действительно, пусть в качестве значения начального элемента принято $\hat{y}_1 = y_1 + \xi_1$, где ξ_1 - ошибка в выборе значения яркости этого элемента. Из (9) следует, что ошибка передается по абсолютной величине в каждый член последовательности y_m , $m = \overline{1, 2M}$, с чередованием знака. Поэтому ее можно практически полностью устранить, сформировав скорректированную последовательность

$$y'_m = \hat{y}_m + (-1)^m (\bar{b}_H - \bar{b}_Ч), \quad m = \overline{1, 2M}, \quad (10)$$

$$\text{где } \bar{b}_Ч = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M y_{2i}, \quad \bar{b}_H = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M y_{2i-1}.$$

Обобщая рассмотренную модель комплексирования на случай K линеек, имеющих взаимные смещения $1/K$, по аналогии с (9) и (10) получим:

$$y_m = X_1, \quad m = \overline{1, K};$$

$$y_m = K \sum_{i=0}^{Z_m-1} (X_{m+1-K(1+i)} - X_{m-K(1+i)}) + X_1, \quad (11)$$

$$m = \overline{K+1, 2M},$$

где $Z_m = \text{ent}((m-1)/K)$;

$$y'_m = y_m + \bar{b} - h_m, \quad m = \overline{1, 2M}, \quad (12)$$

где \bar{b} - среднее значение яркости всей строки, h_m - среднее значение яркости, рассчитанное по множеству отсчетов y_i , для которых $i/K - Z_i = m/K - Z_m$, т.е. для $i = m + K(Z_i - Z_m)$. В данном случае имеется потенциальная возможность повышения разрешающей способности в K раз.

Выполним учет процесса квантования. В полученных выше формулах полагается, что X_m , $m = \overline{1, 2M}$,

не имеют ошибок измерения. На практике для обработки доступны лишь оцифрованные (квантованные) значения X_m , которые по отношению к истинным значениям содержат ошибку квантования ξ_m . С учетом этих ошибок

$$y_m = X_1 + \xi_1, \quad m = \overline{1, K};$$

$$y_m = K \sum_{i=0}^{Z_m-1} (X_{m+1-K(1+i)} - X_{m-K(1+i)}) + X_1 +$$

$$+ K \sum_{i=0}^{Z_m-1} (\xi_{m+1-K(1+i)} - \xi_{m-K(1+i)}) + \xi_1, \quad m = \overline{K+1, 2M}.$$

Рассмотрим алгоритм коррекции ошибок ξ_k на примере двух ПЗС-линеек ($K = 2$). На первом этапе с учетом периодического характера этих ошибок определяются два полинома: один полином (P_H) - по нечетным фотоприемным элементам; второй ($P_Ч$) - по четным элементам. Для каждого m -го элемента полиномы строятся по точкам, принадлежащим некоторой апертуре, симметричной относительно m -го элемента, и для этого элемента вычисляются значения полиномов:

$$y'_m = y_m + (-1)^m 0.5 (P_H - P_Ч), \quad m = \overline{1, 2M}. \quad (13)$$

На втором этапе определяется параметр $\alpha = X_m - 0.5(y'_m + y'_{m+1})$, при котором обеспечивается $y_m + y_{m+1} = X_m$. После этого формируется корректирующая последовательность:

$$y''_m = y'_m + \alpha, \quad y''_{m+1} = y'_{m+1} + \alpha, \quad m = 1, 3, 5, \dots \quad (14)$$

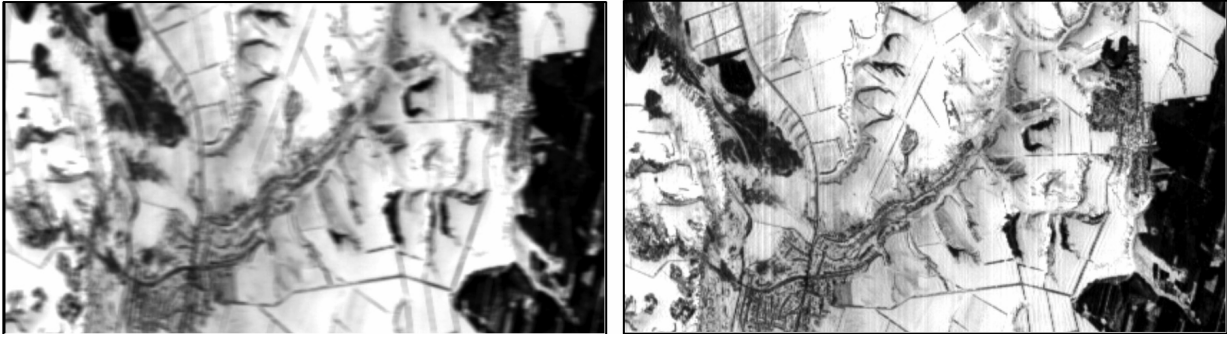


Рис. 3. Исходное изображение от одной из ПЗС-линейки (левый снимок) и результат комплексирования

При идеально выполненной компенсации ошибок квантования погрешность нахождения элементов скомплексированного изображения определяется ошибкой квантования, увеличенной в K раз.

На рис. 3 приведен пример комплексирования изображений от двух субпиксельно смещенных ПЗС-линейк по данным спутника «Ресурс-О1».

Комплексирование разновременных изображений

В данном случае по сравнению с режимом синхронной съемки имеют место существенные различия между совмещаемыми изображениями, которые обусловлены изменением параметров орбиты и углов ориентации спутника, свойств подстилающей поверхности, условий освещенности и др. Компонентами вектора θ уже являются не только углы ориентации спутника, но и параметры его орбиты. Кроме этого разновременные изображения характеризуются существенным различием зон перекрытия. Хотя, в принципе, геометрическое совмещение разновременных изображений описывается теми же моделями (1)-(7).

Что касается яркостного выравнивания разновременных изображений, то оно существенно усложняется. Это связано с различными условиями формирования снимков, а также отличием их перекрывающихся частей по содержанию, что проявляется в присутствии на одном из снимков объектов, не содержащихся на другом.

Рассмотрим алгоритм яркостного выравнивания разновременных изображений, позволяющий решить эту задачу при достаточно высоком уровне (до 20% и выше) содержательных различий в зоне перекрытия [3,4]. В основу алгоритма положены два соображения. Во-первых, содержательные различия проявляются в резком изменении гистограмм сопоставляемых изображений в достаточно локальной области на яркостной оси. В отличие от этого, искомые функциональные яркостные различия проявляются в плавном изменении формы гистограмм во всем яркостном диапазоне. Во-вторых, при корреляционно-экстремальном сопоставлении гистограмм, полученных по данным перекрывающихся областей, содержательные отличия практически не влияют на положение точки максимума взаимно-корреляционной функции, если их доля меньше общего объема видеоданных.

Пусть b_i и b_{i+1} - случайные величины, характеризующие изменение яркостей одноименных точек совмещаемых изображений. Представим b_{i+1} в виде

суммы полезного сигнала b_{i+1} и помехи s , соответствующей содержательным отличиям присоединяемого изображения по отношению к базовому: $b_{i+1} = b_i + s$. Будем считать, что случайные величины b_i, b_{i+1}, b_{i+1}, s характеризуются плотностями распределения вероятности $w_i(b), w_{i+1}(b), w_{i+1}(b), w_s(b)$. В этом случае

$$w_{i+1}(b) = (1-\eta) w_{i+1}(b) + \eta w_s(b), \quad (15)$$

где η - доля содержательных различий.

Если $\mathbf{a} = (a_0, a_1, a_2, \dots)$ - вектор параметров искомой функции Φ , то

$$w_i(b) = \frac{d\varphi^{-1}(b, \mathbf{a})}{db} w_{i+1}[\varphi^{-1}(b, \mathbf{a})]. \quad (16)$$

Для определения Φ вначале путем интегрирования правой и левой частей равенства (16) получим выражение для функции распределения случайной величины b_i :

$$F_i(b) = \int_0^b w_i(z) dz = \int_0^b w_{i+1}[\varphi^{-1}(z, \mathbf{a})] \frac{d\varphi^{-1}(z, \mathbf{a})}{dz} dz. \quad (17)$$

Затем, вводя обозначение $\tau = \varphi^{-1}(z, \mathbf{a})$, преобразуем (17) к виду

$$F_i(b) = \int_0^b w_{i+1}(\tau) d\tau = F_{i+1}(b),$$

где $F_{i+1}(b)$ - функция распределения случайной величины b_{i+1} . Отсюда следует выражение для оценки компонент вектора \mathbf{a} :

$$\varphi(b, \mathbf{a}) = F_i^{-1}[F_{i+1}(b)]. \quad (18)$$

Для анализа доступна аддитивная смесь неискаженного сигнала b_{i+1} и помехи s , в то время как для оценки компонент вектора \mathbf{a} по формуле (18) необходимо определить функцию распределения не зашумленного сигнала b_{i+1} . Для разрешения этой трудности используются два подхода: корреляционное совмещение функций $w_i(b)$ и $w_{i+1}(b)$ и процедура «очистки» функции $w_{i+1}(b)$ от помеховой компоненты $w_s(b)$.

Выполним преобразование гистограммы $w_{i+1}(b)$:

$$w_y(b, \mathbf{z}) = \frac{d\varphi^{-1}(b, \mathbf{z})}{db} w_{i+1}[\varphi^{-1}(b, \mathbf{z})] \quad (19)$$

т.е. получим новую гистограмму $w_y(b, \mathbf{z})$, соответствующую случайной величине $y(\mathbf{z}) = \varphi(b_{i+1}, \mathbf{z})$, где $\mathbf{z} = (z_0, z_1, z_2, \dots)$ - вектор параметров, такой что $y = b_i$ при $\mathbf{z} = \mathbf{a}$. После этого найдем искомую оценку

вектора параметров функции фотометрического преобразования как

$$\mathbf{a} = \arg \max_{\mathbf{z}} \rho_{iy}(\mathbf{z}), \quad (20)$$

где $\rho_{iy}(\mathbf{z})$ – корреляционный коэффициент, найденный по гистограммам $w_i(b)$ и $w_y(b)$.

Далее используется итерационная процедура "очистки" функции $w_{i+1}(b)$ от помеховой компоненты $w_s(b)$. На первой итерации путем корреляционного сопоставления гистограмм $w_i(b)$ и $w_{i+1}(b)$ производится начальная оценка компонент вектора \mathbf{a} , на основе чего определяется начальное приближение функции $w_s(b)$. Далее с использованием формулы (15) выполняется оценка гистограммы полезного сигнала $w_{i+1}(b)$, на основе которой уточняется вектор параметров \mathbf{a} , и так до тех пор, пока η не достигнет достаточно малой величины. Использование вместо интегральных оценок $w_i(b)$ и $w_{i+1}(b)$ их дискретных представлений не меняет общий ход представленных рассуждений.

Комплексирование спектрозональных изображений

Пусть в результате синхронной съемки в различных спектральных диапазонах для одной и той же сцены получены спектрозональные изображения $B_k, k = 1, K$. Задача их комплексирования состоит в получении некоего нового изображения, в котором с повышенной четкостью представлены все объекты наблюдаемой сцены. Эта задача имеет две характерные особенности. Во-первых, снимки, полученные в различных спектральных диапазонах, могут значительно отличаться по статистическим и яркостным характеристикам и информативности. Во-вторых, многие объекты, наблюдаемые в одном спектральном диапазоне, имеют инверсные яркостные характеристики по отношению к одноименным объектам, наблюдаемым в других диапазонах. Рассмотрим два подхода к комплексированию спектрозональных изображений.

Первый подход [5] основан на анализе низко- и высокочастотных компонент изображений. После проведения предварительной обработки (выравнивание средних яркостей и СКО) низкочастотные составляющие спектрозональных изображений мало отличаются друг от друга. Основные различия изображений заключены в их высокочастотных компонентах, в которых содержится информация о контурах и границах объектов наблюдаемой сцены.

Рассмотрим случай комплексирования трех спектрозональных изображений B_1, B_2, B_3 . Представим их в виде сумм низко- и высокочастотных компонент:

$$B_1 = B_{1H} + B_{1B}, B_2 = B_{2H} + B_{2B}, B_3 = B_{3H} + B_{3B}.$$

Низкочастотные составляющие B_{1H}, B_{2H}, B_{3H} комплексировуются путем взвешенного суммирования:

$$D_H(m, n) = \alpha_1 B_{1H}(m, n) + \alpha_2 B_{2H}(m, n) + \alpha_3 B_{3H}(m, n), \quad (21)$$

где $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ – коэффициенты, определяющие уникальность пикселей исходных изображений. Эти коэффициенты вычисляются для каждого элемента изображения D_H как

$$\alpha_1 = \frac{\Delta_{12} + \Delta_{13}}{\Delta_{12} + \Delta_{13} + \Delta_{23}}, \quad \alpha_2 = \frac{\Delta_{12} + \Delta_{23}}{\Delta_{12} + \Delta_{23} + \Delta_{13}}, \quad (22)$$

$$\alpha_3 = \frac{\Delta_{13} + \Delta_{23}}{\Delta_{12} + \Delta_{23} + \Delta_{13}},$$

$$\Delta_{12} = |B_{1H}(m, n) - B_{2H}(m, n)|,$$

$$\Delta_{13} = |B_{3H}(m, n) - B_{1H}(m, n)|,$$

$$\Delta_{23} = |B_{2H}(m, n) - B_{3H}(m, n)|.$$

Чем больше яркость пикселя одного изображения отличается от двух других, тем с большим весом этот пиксель участвует в формировании элемента результирующего изображения. В результате формируется низкочастотная компонента D_H результирующего изображения D .

Высокочастотная компонента $D_B(m, n)$ определяется по следующему правилу. Знак пикселя изображения $D_B(m, n)$ находится как

$$\text{sign} D_B(m, n) = \text{sign}[\alpha_1 B_{1B}(m, n) + \alpha_2 B_{2B}(m, n) + \alpha_3 B_{3B}(m, n)], \quad (23)$$

где коэффициенты $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ определяются по (22), а модуль – вычисляется по выражению

$$|D_B(m, n)| = \max(|B_{1B}(m, n)|, |B_{2B}(m, n)|, |B_{3B}(m, n)|). \quad (24)$$

Результирующее изображение формируется как

$$D(m, n) = D_B(m, n) + D_H(m, n).$$

На рис. 4 приведен пример комплексирования изображений, полученных в трех спектральных каналах (СПК). Выделенный окружностью объект по-разному отображается на трех исходных спектрозональных изображениях, но четко представлен на результирующем снимке.



Рис. 4. Результат комплексирования (б) трех спектрозональных изображений (а)

Второй подход основан на стохастической модели изображений [6]. Эта модель выражает эволюцию функций яркости двух любых спектральнозональных изображений в виде системы:

$$\begin{aligned} d\xi_1(t) &= \theta(t)dt + \sigma_1 dw_1(t), \\ d\xi_2(t) &= \theta(t)dt + \sigma_2 dw_2(t), \\ d\theta(t) &+ \sigma_\theta dw_\theta(t), \end{aligned} \quad (25)$$

где $\xi_1(t)$, $\xi_2(t)$ - яркостные профили рассматриваемых изображений; $w_1(t)$, $w_2(t)$, $w_\theta(t)$ - независимые винеровские процессы; σ_1 , σ_2 , σ_θ - параметры модели комплексирования; $\theta(t)$ - модель функции яркостного профиля скомплексированного изображения.

Процесс комплексирования сводится к оптимальной фильтрации $\theta(t)$ для каждого профиля изображения и интегрированию результата фильтрации в виде сигнала $\theta(t)$, который определяется из системы:

$$\begin{aligned} d\theta &= \gamma t \left[(d\xi_1(t) - \theta(t)dt)\sigma_1^{-2} + (d\xi_2(t) - \theta(t)dt)\sigma_2^{-2} \right], \\ \gamma'(t) &= \sigma_\theta^2 - \gamma^2(t)(\sigma_1^{-2} + \sigma_2^{-2}), \end{aligned} \quad (26)$$

где $\theta(t)$ - оптимальная оценка параметра $\theta(t)$, $\gamma(t)$ - ошибка фильтрации,

$$\gamma(t) = M[\theta(t) - \theta(t)^2].$$

Второе уравнение системы (26) имеет стационарное решение

$$\gamma(t) = \gamma = \sigma_\theta / \sqrt{\sigma_1^{-2} + \sigma_2^{-2}}.$$

Поэтому оценка $\theta(t)$ является решением дифференциального уравнения

$$\begin{aligned} d\theta(t) &= \\ &= \frac{\sigma_\theta \left[(d\xi_1(t) - \theta(t)dt)\sigma_1^{-2} + (d\xi_2(t) - \theta(t)dt)\sigma_2^{-2} \right]}{\sqrt{\sigma_1^{-2} + \sigma_2^{-2}}}. \end{aligned} \quad (27)$$

Практическое использование этого уравнения показало, что его решения сходны с результатами комплексирования путем взвешенного суммирования спектральнозональных изображений. При использовании подобной процедуры происходит сравнительно большая потеря информации. Установлено, что снижение качества комплексирования связано с явлением инверсного отображения определенных объектов на различных спектральнозональных снимках. Формально факт инверсии можно выразить в виде системы:

$$\begin{aligned} d\xi_1(t) &= F_1[\xi_1(t), \xi_2(t), \theta(t)]dt + \sigma_1 dw_1(t), \\ d\xi_2(t) &= F_2[\xi_1(t), \xi_2(t), \theta(t)]dt + \sigma_2 dw_2(t), \\ d\theta(t) &= \sigma_\theta dw_\theta(t), \end{aligned} \quad (28)$$

где F_1 , F_2 являются неупреждающими функционалами. Процессы $\xi_1(t)$, $\xi_2(t)$ введены в качестве параметров этих функционалов для того, чтобы учесть степень информационной связанности $\xi_1(t)$ и $\xi_2(t)$. Идентификация инверсных областей выполняется в результате решения системы

$$\begin{aligned} d\xi_1(t) &= \theta_1(t)dt + \sigma_1 dw_1(t) \\ d\theta_1(t) &= \sigma_{\theta_1} dw_{\theta_1}(t) \end{aligned}$$

из которой оценивается производная для первого изображения. В результате оптимальной фильтрации $\theta_1(t)$ определяется система

$$\begin{aligned} d\theta_1(t) &= \frac{\gamma_1(t)}{\sigma_1^2} [d\xi_1 - \theta_1(t)dt], \\ \gamma_1'(t) &= -(\gamma_1^2(t)) / \sigma_1^2 + \sigma_{\theta_1}^2. \end{aligned}$$

Учитывая существование стационарного решения во втором уравнении $\gamma_1 = \sigma_{\theta_1} \sigma_1$, получим:

$$d\theta_1(t) = \frac{\sigma_{\theta_1}}{\sigma_1} [d\xi_1(t) - \theta_1(t)dt].$$

Далее с использованием стохастической системы

$$d\xi_2(t) = \beta(t)\theta_1(t)dt + \sigma_2 dw_2(t), \quad d\beta(t) = \sigma_\beta dw_\beta(t)$$

оценивается параметр $\beta(t)$, выражающий мультипликативную связь производных двух изображений:

$$\begin{aligned} d\beta(t) &= \frac{\gamma_\beta(t)\theta_1(t)}{\sigma_2^2} [d\xi_2(t) - \theta_1(t)\beta(t)dt], \\ \gamma_\beta'(t) &= \sigma_\beta^2 - \frac{\gamma_\beta^2(t)\theta_1^2(t)}{\sigma_2^2}. \end{aligned}$$

Используя аттрактор второго уравнения

$$\gamma_\beta(t) = (\sigma_2 \sigma_\beta) / \theta_1(t),$$

получим

$$d\beta(t) = \frac{\sigma_\beta}{\sigma_2} [d\xi_2(t) - \theta_1(t)\beta(t)dt]. \quad (29)$$

Инверсным областям соответствует $\beta(t) < 0$. Обозначим через $b(t)$ функцию, принимающую значение -1 на инверсных участках и 1 на всех остальных. В результате на основе (25) получим систему:

$$\begin{aligned} d\xi_1(t) &= \theta(t)dt + \sigma_1 dw_1(t), \\ d\xi_2(t) &= \theta(t)b(t)dt + \sigma_2 dw_2(t), \\ d\theta(t) &= \sigma_\theta dw_\theta(t). \end{aligned}$$

Оценка (27) в этом случае изменится:

$$\begin{aligned} d\theta(t) &= \frac{\sigma_\theta}{\sqrt{\sigma_1^{-2} + \sigma_2^{-2}}} \times \\ &\left\{ [d\xi_1(t) - \theta(t)dt]\sigma_1^{-2} + b(t)[d\xi_2(t) - b(t)\theta(t)dt]\sigma_2^{-2} \right\}. \end{aligned} \quad (30)$$

Комплексирование данных панхроматической и спектральнозональной съемок

Пусть $D = D(m, n)$ - панхроматическое изображение высокого разрешения, а $B_k = B_k(m, n)$, $k = 1, K$, - спектральнозональные изображения с многократно худшим разрешением, полученные одновременно с $D(m, n)$. Будем считать, что все эти изображения после проведения координатной обработки геометрически совмещены.

Задача получения для $D(m, n)$ спектрально-зональных компонент $D_k = D_k(m, n)$, $k = 1, K$, примерно такого же разрешения решается в два этапа [5].

На первом этапе по изображениям B_k , $k = 1, K$, выполняется оценка спектральной яркости точек земной поверхности в виде полинома

$$G(\lambda) = \sum_{r=0}^{K-1} a_r \lambda^r$$

в результате решения системы, описывающей процесс формирования спектрально-зональных изображений:

$$B_k = \int_{\lambda_k'}^{\lambda_k''} \left(\sum_{r=0}^{K-1} a_r \lambda^r \right) \times \sum_{j=1}^{j_{k-1}} \left(\frac{S_{k,j+1} - S_{kj}}{\lambda_{k,j+1} - \lambda_{kj}} + \frac{S_{k,j+1} \lambda_{kj} - S_{kj} \lambda_{k,j+1}}{\lambda_{k,j+1} - \lambda_{kj}} \right) d\lambda, k = \overline{1, K}, \quad (31)$$

где S_{kj} - j -й отсчет функции спектральной чувствительности датчика в k -м диапазоне на длине волны λ_{kj} ; λ_k' , λ_k'' - нижняя и верхняя границы волн в k -м диапазоне.

Интегрируя (31) по формуле трапеций, получим

$$B_k = \sum_{r=0}^{K-1} a_r \sum_{j=1}^{j_{k-1}} \left[\frac{\lambda_{k,j+1}^{r+2} - \lambda_{kj}^{r+2}}{\lambda_{k,j+1} - \lambda_{kj}} \frac{S_{k,j+1} - S_{kj}}{r+2} + \frac{\lambda_{k,j+1}^{r+1} - \lambda_{kj}^{r+1}}{\lambda_{k,j+1} - \lambda_{kj}} \frac{S_{k,j+1} \cdot \lambda_{kj} - S_{kj} \lambda_{k,j+1}}{r+1} \right], k = \overline{1, K}.$$

Из этой линейной системы находятся коэффициенты a_r , $r = 0, K-1$, т.е. полином

$$G(\lambda) = \sum_{r=0}^{K-1} a_r \lambda^r.$$

На втором этапе, используя механизм модуляции сигналом D спектрально-зональных компонент, определяемых $G(\lambda)$ и границами спектральных диапазонов λ_k' , λ_k'' , $k = 1, K$, получим K спектрально-зональных компонент высокого пространственного разрешения:

$$D_k = D \frac{\int_{\lambda_k'}^{\lambda_k''} G(\lambda) d\lambda}{\frac{1}{K} \int_{\lambda_k'}^{\lambda_k''} G(\lambda) d\lambda} = D \frac{\sum_{r=0}^{K-1} \left(a_r \frac{(\lambda_k'')^{r+1} - (\lambda_k')^{r+1}}{r+1} \right)}{\frac{1}{K} \sum_{r=0}^{K-1} \left(a_r \frac{(\lambda_k'')^{r+1} - (\lambda_k')^{r+1}}{r+1} \right)}, \quad (32)$$

$k = \overline{1, K}$

Выражение, стоящее в знаменателе, влияет на распределение энергетической яркости по диапазонам пропорционально соотношению спектрально-зональных сигналов B_k , $k = 1, K$.

Заключение

Экспериментальные исследования рассмотренных методов комплексирования спектрально-зональных изображений с использованием реальной космической видеоинформации дали следующие результаты.

Технология комплексирования синхронно формируемых изображений (1-я задача) позволяет выполнить их геометрическое объединение с точностью 0,3 пикселя и яркостное выравнивание с относительной точностью 0,2 %.

В условиях действия шумов квантования при комплексировании данных от двух субпиксельно смещенных ПЗС-линеек (2-я задача) достигается повышение разрешающей способности съемки в 1,5 раза, а при комплексировании данных от трех ПЗС-линеек – в 1,9 раза.

На основе методов комплексирования разновременных изображений (3-я задача) создана технология регионального картографирования, обеспечивающая визуально незаметное совмещение различных снимков.

Рассмотренные методы комплексирования спектрально-зональных видеоданных (4-я задача) позволяют получить снимки, детальность которых по спектральному критерию повышается на 30-40 %.

Технология «раскраски» панхроматических изображений (5-я задача) позволяет сформировать спектрально-зональные изображения, близкие по разрешающей способности к черно-белым снимкам.

Рассмотренные методы и технологии практически реализованы в ряде программных комплексов и используются в настоящее время для обработки данных ДЗЗ от космических систем «Ресурс-О1», «Монитор-Э», «Аркон» и «Ресурс-ДК».

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 05-01-08004).

Литература

1. Злобин В.К., Еремеев В.В. Обработка аэрокосмических изображений. М.: Физматлит, 2006. 288 с.
2. Еремеев В.В., Злобин В.К. Статистические алгоритмы радиометрической коррекции видеоинформации от многоэлементных сканирующих систем // Автометрия, 1995. №2. с. 78-83.
3. Патент RU 2171499 С1. Способ формирования изображений / В.К.Злобин, В.В.Еремеев, А.Е.Кузнецов и др. Опубл. 27.07.2001. Бюл. № 21. 12 с.
4. Злобин В.К., Еремеев В.В., Новоселов В.Г. Алгоритм высокоточного фотометрического совмещения разновременных космических изображений // Автометрия. 2000. № 3. С. 28-34.
5. Злобин В.К., Еремеев В.В., Москвитин А.Э. Повышение информативности материалов космической съемки путем комплексирования спектрально-зональной видеоинформации // Известия Тульского гос. университета. Тула, 2005. №4. С.35-41.
6. Злобин В.К., Еремеев В.В., Васильев В.М. Стохастическая модель космических изображений и ее использование для сегментации природных объектов // Автометрия. 2001. № 2. С. 32-39.