

УДК 004.932.2

А.Е. Кузнецов, П.Н. Светелкин

## ОПЕРАТИВНОЕ СОВМЕЩЕНИЕ СПЕКТРОЗОНАЛЬНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПРИ ЦВЕТОСИНТЕЗЕ

*Предлагается алгоритм геометрического совмещения спектрально-зонных спутниковых изображений при цветосинтезе, позволяющий в автоматическом режиме определять априорно неизвестные параметры взаимного рассогласования по пирамидально представленным снимкам. Рассматриваются особенности практической реализации алгоритма в ходе оперативного получения цветных изображений от космического аппарата «Ресурс-ДК».*

**Введение.** На космических аппаратах (КА) типа «Ресурс-ДК», «Метеор-М» и др. для съемки земной поверхности в видимом диапазоне спектра используются сканирующие датчики, состоящие из трех оптико-электронных преобразователей (ОЭП). Каждый ОЭП обеспечивает формирование изображения в своем спектральном диапазоне: 0,5-0,6 мкм, 0,6-0,7 мкм, 0,7-0,8 мкм и состоит из одной непрерывной или составной линейки приемников с зарядовой связью, установленной перпендикулярно к направлению полета спутника. Линейки ОЭП расположены в фокальной плоскости последовательно друг за другом, в результате чего получаемые изображения  $B = \{b(m_b, n_b)\}$ ,  $G = \{g(m_g, n_g)\}$ ,  $R = \{r(m_r, n_r)\}$ ,  $m_k = \overline{1, M}$ ,  $n_k = \overline{1, N}$ ,  $k \in \{b, g, r\}$  пространственно сдвинуты друг относительно друга (рисунок 1). Понятно, что для формирования цветосинтезированного изображения необходимо геометрически совместить три спектрально-зонных снимка. При этом одно из изображений, например  $B$ , выбирается в качестве базового, а два других геометрически с ним совмещаются:

$$\begin{aligned} \hat{G} &= \{\hat{g}(m_b, n_b) = g(m_g, n_g)\}, \\ m_b &= F_g(m_g, n_g), \quad n_b = \Phi_g(m_g, n_g); \\ \hat{R} &= \{\hat{r}(m_b, n_b) = r(m_r, n_r)\}, \\ m_b &= F_r(m_r, n_r), \quad n_b = \Phi_r(m_r, n_r), \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\hat{G}$ ,  $\hat{R}$  – геометрически преобразованные снимки;  $F = (F_g, F_r)$ ,  $\Phi = (\Phi_g, \Phi_r)$  – функции координатного соответствия. После этого цветосинтезированное изображение  $Z$  может быть представлено кортежем  $Z = \{B, \hat{G}, \hat{R}\}$ .

Уравнения геометрического трансформирования  $F$  и  $\Phi$  можно определить на основе параметров геопривязки каждого изображения.

Пусть  $f_k$  аналитическая функция, позволяющая на основе данных об орбитальном положении КА и параметров съемочного устройства рассчитать для каждого пикселя его географические координаты  $(\varphi, \lambda)$  [1],

$$\begin{aligned} \varphi_k &= f_{k\varphi}(m_k, n_k), \quad \lambda_k = f_{k\lambda}(m_k, n_k), \\ \mathbf{f}_k &= (f_{k\varphi}, f_{k\lambda}), \quad k \in \{b, g, r\}. \end{aligned} \quad (2)$$

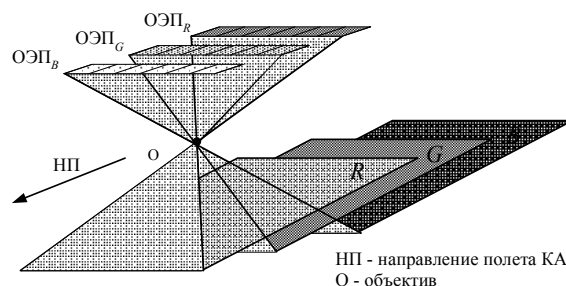


Рисунок 1 – Схема спектрально-зонной съемки тремя ОЭП

Тогда с учетом обратной функции  $f_k^{-1}$  координатное преобразование в выражении (1) можно записать в виде:

$$\begin{aligned} m_b &= f_{b\varphi}^{-1}[f_{g\varphi}(m_g, n_g), f_{g\lambda}(m_g, n_g)], \\ n_b &= f_{b\lambda}^{-1}[f_{g\varphi}(m_g, n_g), f_{g\lambda}(m_g, n_g)], \\ m_b &= f_{b\varphi}^{-1}[f_{r\varphi}(m_r, n_r), f_{r\lambda}(m_r, n_r)], \\ n_b &= f_{b\lambda}^{-1}[f_{r\varphi}(m_r, n_r), f_{r\lambda}(m_r, n_r)]. \end{aligned} \quad (3)$$

К сожалению, выполнить геометрическое совмещение снимков по уравнениям (3) с высокой точностью не удастся. Это вызвано тем, что из-за ошибок измерения внешних и внутренних параметров ориентирования съемочного устройства, функции  $f_k$  определяются с погрешностями. Эксперименты показали, что для КА «Ресурс-ДК» ошибка совмещения изображений не является постоянной величиной и может в от-

дельных случаях достигать нескольких сотен пикселей.

В геоинформационной системе ERDAS для совмещения снимков в условиях неопределенности используется модуль AutoSync [2]. В этом модуле вначале вручную необходимо найти несколько точек для установления базового соотношения между снимками, а затем запускается процедура автоматического поиска связующих точек с использованием аппарата корреляционно-экстремального отождествления (КЭО). По найденным точкам строится регрессионная модель координатного соответствия вида (1).

Необходимость ручного определения связующих точек вызвана тем, что при существенных координатных смещениях процедура КЭО одноименных сюжетов требует значительных временных затрат и, кроме того, может давать недостоверные результаты идентификации [3].

**Цель работы.** Целью настоящей работы является разработка алгоритма оперативного совмещения спектрозональных изображений, не требующего ручных операций и основанного на механизме пирамидального представления изображений.

#### Оперативное совмещение изображений.

Рассмотрим два изображения  $B$  и  $G$ , геометрически смещенные друг относительно друга на величину  $d$ . Если на их основе сформировать два новых снимка  $\tilde{B}$  и  $\tilde{G}$  с более низким пространственным разрешением,

$$\psi : \{B \rightarrow \tilde{B}, G \rightarrow \tilde{G}\}, \quad (4)$$

где  $\psi$  – оператор масштабного преобразования с коэффициентом  $\mu$ , то величина координатного рассогласования в пикселях  $\tilde{d}$  уменьшится в  $\mu$  раз,  $\tilde{d} = d/\mu$ . С учетом данного свойства алгоритм поиска одноименных сюжетов построим следующим образом.

Определим на базовом изображении  $B$  несколько равномерно расположенных по полю снимка квадратных фрагментов  $B_{\phi_i}$  размером  $L \prod_{s=2}^S \mu_s \times L \prod_{s=2}^S \mu_s$  пикселей,  $i = \overline{1, I}$ ,  $I \geq 4$ , где  $S$  – количество уровней пирамидального представления изображения. Зададим для каждого фрагмента  $B_{\phi_i}$  на изображении  $G$  зоны поиска  $G_i$  размером  $K \times K$  пикселей.

Поскольку одноименные объекты, наблюдаемые в различных спектральных диапазонах, могут иметь инверсию по яркости [1], то для выполнения КЭО приведем фрагменты к контурному виду,

$$C : \{B_i \rightarrow B_i^*, G_i \rightarrow G_i^*; i = \overline{1, I}\}, \quad (5)$$

где  $C$  – оператор пространственного дифференцирования Собела [3]. Затем сформируем пирамиду разномасштабных фрагментов  $\tilde{B}_{\phi_{si}}^*$  и  $\tilde{G}_{si}^*$ ,  $s = \overline{1, S}$ ,

$$\begin{aligned} B_{\phi_i}^* &= \tilde{B}_{\phi_{i1}}^* \xrightarrow{\Psi_2} \tilde{B}_{\phi_{i2}}^* \xrightarrow{\Psi_3} \dots \xrightarrow{\Psi_s} \tilde{B}_{\phi_{iS}}^*, \\ G_i^* &= \tilde{G}_{i1}^* \xrightarrow{\Psi_2} \tilde{G}_{i2}^* \xrightarrow{\Psi_3} \dots \xrightarrow{\Psi_s} \tilde{G}_{iS}^*, \end{aligned} \quad (6)$$

$$i = \overline{1, I}.$$

Далее, в центре каждого фрагмента  $\tilde{B}_{\phi_{si}}^*$  выделим базовый участок  $\tilde{B}_{si}^*$  размером  $L \times L$  пикселей. С помощью нормированной взаимной корреляционной функции

$$\begin{aligned} \rho(\alpha, \beta) &= \frac{1}{\sigma_b \sigma_g} \times \\ &\times \left[ \frac{1}{L^2} \sum_{l_1=0}^{L-1} \sum_{l_2=0}^{L-1} b(l_1, l_2) g(l_1 + \alpha, l_2 + \beta) - \bar{b} \bar{g} \right], \end{aligned} \quad (7)$$

где  $b(l_1, l_2)$  – элемент изображения  $\tilde{B}_{is}^*$ ;  $g(l_1 + \alpha, l_2 + \beta)$  – пиксель пробного фрагмента изображения  $\tilde{G}_{is}^*$ , взятого со смещением  $(\alpha, \beta)$ ;  $\sigma_b$ ,  $\sigma_g$  и  $\bar{b}$ ,  $\bar{g}$  – среднеквадратические отклонения и средние значения отсчетов яркости фрагментов изображений, выполним отождествление сюжетов на фрагментах  $\tilde{B}_{si}^*$  и  $\tilde{G}_{si}^*$ ,  $s = \overline{1, S}$ ,  $i = \overline{1, I}$  и оценим средние значения величин их взаимного смещения

$$\bar{\alpha}_S = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I \alpha_{Si}, \quad \bar{\beta}_S = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I \beta_{Si}. \quad (8)$$

Будем считать, что координатное рассогласование между одноименными объектами на уровне  $S$  не наблюдается, если

$$(\bar{\alpha}_{Si} \leq 1) \wedge (\bar{\beta}_{Si} \leq 1), \quad i = \overline{1, I}. \quad (9)$$

В случае выполнения условия (9) проведем КЭО фрагментов на уровне  $s = S - 1$  и так до тех пор, пока условие (9) не перестанет выполняться.

Пусть для  $s$ -го уровня пирамиды условие (9) не выполняется. При этом стоит заметить, что размер базового фрагмента на всех уровнях пирамиды является константой, а размер области поиска  $K_s \times K_s$  для  $s$ -го уровня вычисляется по формуле

$$K_s = L + 2d \prod_{j=2}^s \mu_j. \quad (10)$$

Для остальных уровней пирамиды значение  $K_j$ ,  $j = \overline{1, s-1}$  определяется как

$$K_j = L + 2\mu_{j+1}, \quad j = \overline{1, s-1}. \quad (11)$$

Тогда найденные для  $i$ -го фрагмента параметры взаимного смещения  $\alpha_{si}$  и  $\beta_{si}$  характеризуют положение фрагмента  $\tilde{B}_{s-1,i}^*$  в области определения фрагмента  $\tilde{G}_{s-1,i}^*$  с точностью, определяемой коэффициентом масштабного сжатия  $\mu_s$ . Т.е. в данном случае фрагмент  $\tilde{B}_{s-1,i}^*$  должен коррелироваться с областью размером  $K_{s-1} \times K_{s-1}$ ,  $K_{s-1} = L + 2\mu_s$  (рисунок 2), причем координаты центра базового фрагмента и области поиска ( $m_{s-1,i}, n_{s-1,i}$ ) определяются по формулам:

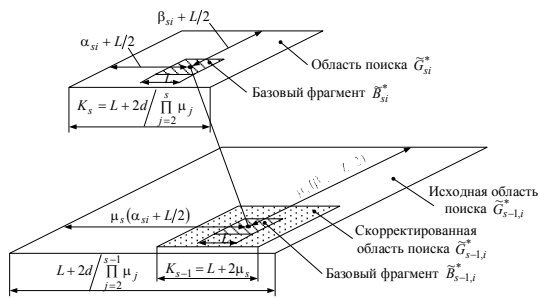
$$\begin{aligned} m_{s-1,i} &= \mu_s(\alpha_{si} + L/2), \\ n_{s-1,i} &= \mu_s(\beta_{si} + L/2). \end{aligned} \quad (12)$$

Процесс последовательного уточнения параметров  $\alpha_{si}$  и  $\beta_{si}$  взаимного смещения изображений  $B$  и  $G$  прекращается при идентификации фрагментов первого уровня пирамиды  $\tilde{B}_{1i}^*$  и  $\tilde{G}_{1i}^*$ ,  $i = \overline{1, I}$ .

Обозначим взаимные смещения, найденные на последнем шаге, как  $\alpha_{1i}$  и  $\beta_{1i}$ ,  $i = \overline{1, I}$ . Тогда уравнения геометрического соответствия изображений  $B$  и  $G$  в формуле (1) можно представить регрессионными выражениями:

$$m_b = \mathbf{h}\mathbf{a}, \quad n_b = \mathbf{h}\mathbf{c}, \quad (13)$$

где  $\mathbf{a}$ ,  $\mathbf{c}$  – векторы коэффициентов, рассчитанные по методу наименьших квадратов на основе координат центров фрагментов и смещений  $\alpha_{1i}$ ,  $\beta_{1i}$ ;  $\mathbf{h}$  – матрица предикторных переменных ( $m_g, n_g$ ).



**Рисунок 2 – Уточнение области поиска при идентификации пирамидальных сюжетов**

Таким образом, рассмотренный алгоритм позволяет в автоматическом режиме определить параметры взаимного рассогласования изображений и выполнить их геометрическое совмещение. Причем за счет сокращения зоны поиска в обрабатываемом слое пирамиды достигается высокое быстродействие предложенного подхода.

**Практическая реализация.** Рассмотрим особенности реализации алгоритма при совмещении спектрозональных изображений КА «Ресурс-ДК», для которых число столбцов  $M = 36000$ , а число строк  $N$  может достигать 300000 и более.

Во-первых, эксперименты показали, что надежное КЭО достигается с использованием трех уровней пирамидального представления изображений ( $S = 3$ ) с коэффициентами масштабного сжатия  $\mu_2 = 8$  и  $\mu_3 = 2$ . При этом рассматривались два варианта построения оператора  $\psi_s$  – на основе прореживания и усреднения видеоданных.

В первом случае элементы «заглубленного» изображения формируются по правилу

$$\tilde{k}_s(x, y) = \tilde{k}_{s-1}(x\mu_s, y\mu_s), \quad \tilde{k} \in \{b, g, r\}, \quad (14)$$

$$x = \overline{1, X_{kis}}, \quad y = \overline{1, Y_{kis}}, \quad i = \overline{1, I}, \quad s = \overline{2, S},$$

где  $X_{kis}$  и  $Y_{kis}$  – размеры  $i$ -го фрагмента на  $s$ -м уровне.

Во втором случае элементы «заглубленного» изображения рассчитываются по формуле

$$\tilde{k}_s(x, y) = \frac{1}{\mu_s^2} \sum_{a_1=1}^{\mu_s} \sum_{a_2=1}^{\mu_s} \tilde{k}_{s-1}(x\mu_s + a_1, y\mu_s + a_2), \quad (15)$$

$$\tilde{k} \in \{b, g, r\}, \quad x = \overline{1, X_{kis}}, \quad y = \overline{1, Y_{kis}},$$

$$i = \overline{1, I}, \quad s = \overline{2, S}.$$

В ходе моделирования установлено, что средняя ошибка определения параметров смещения для оператора усреднения с  $\mu_2 = 8$  составляет 3,6 пикселя, а для оператора прореживания составляет около 4,3 пикселя. Поскольку для больших объемов, читаемых с диска данных, операция прореживания выполняется быстрее, то это и предопределяет вид оператора  $\psi_2$ . В качестве  $\psi_3$  выбран оператор усреднения, т.к. прореженное изображение второго уровня пирамиды уже находится в памяти компьютера и формирование изображения третьего уровня занимает незначительное время.

Во-вторых, для оперативного совмещения изображений равнинных участков местности с точностью порядка 2-3 пикселей достаточно использовать линейную модель координатного соответствия (13),

$$\begin{cases} m_b = a_0 + a_1 m_g + a_2 n_g; \\ n_b = c_0 + c_1 m_g + c_2 n_g. \end{cases} \quad (16)$$

При этом для расчета коэффициентов в уравнении (16) на базовом изображении задаются 4 фрагмента, расположенные в углах снимка.

В-третьих, разработан комплекс мероприятий по обеспечению надежной работы КЭО. Здесь важным является правильный выбор фраг-

ментов для проведения последующего КЭО. Фрагменты на базовом изображении должны задаваться так, чтобы не содержать участки с вырожденным сюжетом (водная поверхность, поля, облака и т.п.). Для отбраковки фрагментов предлагается использовать два уровня фильтрации: оперативную фильтрацию по статистическим характеристикам фрагментов и отбраковку по результатам КЭО. Двухуровневая отбраковка позволяет ускорить нахождение параметров взаимного смещения изображений за счет сокращения вычислений значений корреляционной функции (КФ) по отбраковываемым впоследствии низкоинформативным сюжетам.

При отбраковке по статистическим характеристикам фрагментов используется критерий, согласно которому исключаются из рассмотрения сюжеты, среднее квадратическое отклонение (СКО) яркости которых меньше заданного порогового уровня. Кроме того, после нахождения  $I$  базовых фрагментов, удовлетворяющих вышеуказанному критерию, выполняется проверка на их статистическую однородность. Критерий Фишера в данном случае применить невозможно вследствие того, что базовый фрагмент захватывает небольшую область снимка высокого разрешения и из-за этого фрагменты значительно отличаются по своим СКО. Для отбраковки низкоинформативных фрагментов введен эмпирический критерий

$$\frac{\sigma_{ord,1}}{\sigma_{ord,i}} > 3; i = \overline{2, I}, \quad (17)$$

где  $\sigma_{ord,i}$  – упорядоченные по убыванию дисперсии  $\sigma_i$ ,  $i = \overline{1, I}$  базовых фрагментов, т.е.  $\sigma_{ord,i} > \sigma_{ord,i+1}$ ,  $i = \overline{1, I-1}$ . Если фрагмент отбраковывается по эмпирическому критерию (17), то выполняется его повторный поиск.

Для фильтрации результатов КЭО используются три критерия [1]:

- значение корреляционной функции (КФ) менее 0,3;
- СКО пика КФ в окрестности максимума менее 0,02;
- эксцесс КФ менее 0,5.

Первый критерий необходим для отбраковки ложных результатов совмещения изображений. После прохождения первого критерия значение КФ проверяется на размытость пика по второму критерию. Третий критерий необходим для отбраковки изображений с мелкой стохастической текстурой (например, поле, луг) и основан на экспериментально установленном факте, что автокорреляционная функция таких фрагментов имеет ярко выраженный пикообразный характер.

В качестве такого критерия выступает эксцесс автокорреляционной функции, который вычисляется по формуле

$$\varepsilon = \frac{\sum_{\alpha} \sum_{\beta} [\rho(\alpha, \beta) - \bar{\rho}]^4}{\sum_{\alpha} \sum_{\beta} [\rho(\alpha, \beta) - \bar{\rho}]^2} - 3, \quad (18)$$

где  $\bar{\rho}$  – математическое ожидание КФ.

На основе найденных по результатам КЭО смещений строится полиномиальная модель вида (16) и выполняется совмещение спектральных изображений.

**Заключение.** Механизм пирамидального представления спутниковых изображений позволяет создавать высокоэффективные алгоритмы и технологии обработки видеоданных сверхбольшого объема. Реализованный на этом принципе алгоритм нахождения параметров взаимного рассогласования и совмещения спектральных изображений запрограммирован в виде DLL-модуля, который используется в составе программных комплексов обработки изображений от КА «Ресурс-ДК» OrthoNormScan, MobilCatalog, GeoScan. Модуль обеспечивает унифицированную обработку как 8-, так и 10-битных изображений и применяется в ходе оперативного цветосинтеза при визуализации и каталогизации данных, а также для устранения начальных рассогласований при прецизионном совмещении изображений трех спектральных каналов. При этом параметры совмещения надежно определяются в большинстве случаев, за исключением снимков, целиком содержащих водную поверхность, степные и пустынные участки. При испытаниях, которые выполнялись на персональном компьютере с процессором Pentium 4 3ГГц, на кадрах с длиной строки 36000 пикселей были получены следующие временные характеристики:

- общее время определения параметров взаимного смещения от 40 до 120с;
- суммарное время, затрачиваемое на вычисление КФ, составляет 2,7с;
- суммарное время выделения контуров по фрагментам – 0,08с.

#### **Библиографический список**

1. Обработка изображений в геоинформационных системах: учебное пособие / В.К. Злобин, В.В. Еремеев, А.Е. Кузнецов. – Рязань: РГРТУ, 2006. – 264 с.
2. <http://www.dataplus.ru/soft/Leica/AutoSync.html>
3. Прэтт У. Цифровая обработка изображений. В 2-х кн.: пер. с англ. М.: Мир, 1982. Кн.1: 312 с., кн.2: 480 с.