

## ФОРМИРОВАНИЕ ЦВЕТНЫХ СНИМКОВ ПО СПУТНИКОВЫМ ИЗОБРАЖЕНИЯМ СРЕДНЕГО И ВЫСОКОГО ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ

Кузнецов А.Е., д.т.н, зам.директора НИИ «Фотон» РГРТУ,  
Светелкин П.Н., м.н.с. НИИ «Фотон» РГРТУ, [foton@rgta.ryazan.ru](mailto:foton@rgta.ryazan.ru)

**Ключевые слова:** дистанционное зондирование, спутниковый снимок, сканер, пространственное разрешение, цветное изображение, модель комплексирования, триангуляция.

### Введение

В последнее время в системах дистанционного зондирования Земли среднего (КА «Метеор-М») и высокого пространственного разрешения (КА «Ресурс-ДК») проектирование съемочных устройств (СУ) осуществляется по принципу пространственно распределенной регистрации поступающего электромагнитного излучения. В соответствии с этим принципом в фокальной плоскости сканера на некотором расстоянии друг от друга устанавливаются три оптико-электронных преобразователя (ОЭП), каждый из которых обеспечивает наблюдение подстилающей поверхности в определенном спектральном диапазоне. В результате съемки формируются три разновременных спектрозональных снимка  $B_k = \{b_k(m_k, n_k)\}$ ,  $m_k = \overline{0, M_k - 1}$ ,  $n_k = \overline{0, N_k - 1}$ ,  $k = \overline{1, 3}$ , пространственно смещенные друг относительно друга.

Подобный принцип съемки с одной стороны позволяет, во-первых, упростить и удешевить конструкцию сканера и, во-вторых, получать изображения  $B_k$  с более высокими радиометрическими характеристиками. Но с другой стороны возникают дополнительные требования к наземной обработке получаемой видеoinформации, связанные прежде всего с формированием цветосинтезированных снимков. В настоящей работе рассматриваются алгоритмы получения цветных снимков, связанные с геометрическим и радиометрическим комплексированием исходных изображений в системе координат базового снимка (снимка, сформированного вторым по счету ОЭП).

### Модели геометрического комплексирования изображений

Один из подходов геометрического совмещения спектрозональных снимков базируется на аналитической модели координатного соответствия, параметры которой можно рассчитать на основе уравнений географической привязки изображений  $B_k$ . Эти уравнения составляются на основе параметров орбитального положения КА во время съемки и его ориентации при известных параметрах внутреннего ориентирования съемочного устройства [1] и представляется в виде:

$$\varphi_k = F_k(m_k, n_k), \lambda_k = \Phi_k(m_k, n_k), k = \overline{1, 3}, \quad (1)$$

Рассматриваются модели геометрического и радиометрического комплексирования спутниковых снимков среднего и высокого разрешения с целью получения цветных изображений.

где  $(\varphi_k, \lambda_k)$  – геодезические координаты пикселя  $b_k(m_k, n_k)$ . Тогда аналитическая модель геометрического соответствия между базовым и совмещаемым изображением будет выглядеть следующим образом:

$$m_k = F_k^*(m, n), n_k = \Phi_k^*(m, n), F_k^*(m, n) = F_k^{-1}[F(m, n), \Phi(m, n)], \\ \Phi_k^*(m, n) = \Phi_k^{-1}[F(m, n), \Phi(m, n)], m = m_2, n = n_2, k = \overline{1, 3}, \quad (2)$$

где  $F_k^{-1}$ ,  $\Phi_k^{-1}$  – обратные функции географической привязки элементов изображения.

Основная сложность построения аналитической модели координатного соответствия заключается в том, что на основе модели орбитальной съемки обратные функции  $F_k^{-1}$ ,  $\Phi_k^{-1}$  получить не удастся. Поэтому для определения зависимости планарных  $(m_k, n_k)$  от геодезических координат  $(\varphi_k, \lambda_k)$  снимка воспользуемся следующим итерационным алгоритмом. Сначала определим начальное приближение планарных координат  $(m_{k0}, n_{k0})$  искомой точки, в качестве которого могут, например, выступать координаты центра кадра:  $m_{k0} = M_k/2$ ,  $n_{k0} = N_k/2$ . Затем на основе формулы приращения функции нескольких переменных применительно к прямым зависимостям запишем:

$$\varphi_k = \varphi + \frac{\partial F_k}{\partial m_k} \Delta m_k + \frac{\partial F_k}{\partial n_k} \Delta n_k, \\ \lambda_k = \lambda + \frac{\partial \Phi_k}{\partial m_k} \Delta m_k + \frac{\partial \Phi_k}{\partial n_k} \Delta n_k. \quad (3)$$

Выражая  $\Delta m_k$ ,  $\Delta n_k$  через  $\varphi_k$ ,  $\lambda_k$ , получим поправки к планарным координатам искомой точки для  $i$ -го шага итерации:

$$\Delta m_{ki} = \frac{\left( (\lambda_{ki} - \lambda) \frac{\partial F_k}{\partial n_k} - (\varphi_{ki} - \varphi) \frac{\partial \Phi_k}{\partial n_k} \right)}{\left( \frac{\partial F_k}{\partial m_k} \frac{\partial \Phi_k}{\partial n_k} - \frac{\partial F_k}{\partial n_k} \frac{\partial \Phi_k}{\partial m_k} \right)}, \\ \Delta n_{ki} = \frac{\left( (\varphi_{ki} - \varphi) \frac{\partial \Phi_k}{\partial m_k} - (\lambda_{ki} - \lambda) \frac{\partial F_k}{\partial m_k} \right)}{\left( \frac{\partial F_k}{\partial m_k} \frac{\partial \Phi_k}{\partial n_k} - \frac{\partial F_k}{\partial n_k} \frac{\partial \Phi_k}{\partial m_k} \right)}. \quad (4)$$

Частные производные в формулах (4) вычислим через конечные разности, тогда географические координата-



ты для  $i$ -ой итерации определим как  $\varphi_{ki} = F_k(m_{ki}, n_{ki})$ ,  $\lambda_{ki} = \Phi_k(m_{ki}, n_{ki})$ . На каждой итерации выполним уточнение географических координат искомой точки  $m_{k,i+1} = m_{ki} + \Delta m_{ki}$ ,  $n_{k,i+1} = n_{ki} + \Delta n_{ki}$ .

Условием выхода из итерационного процесса служит достижение рассогласования в плоскостных координатах незначимых величин  $\Delta m_{ki} \leq \delta_m$ ,  $\Delta n_{ki} \leq \delta_n$ , где  $\delta_m$ ,  $\delta_n$  выбираются в зависимости от необходимой точности решения поставленной задачи и обычно составляют десятые или сотые доли пикселя. С учетом описанного выше итерационного алгоритма схема вычисления  $Z$  значений функций  $F_k^*(m, n)$ ,  $\Phi_k^*(m, n)$  будет выглядеть так:

$$(m_z, n_z) \xrightarrow{F_z, \Phi_z} (\varphi_z, \lambda_z) \xrightarrow{F_k^{-1}, \Phi_k^{-1}} (m_{kz}, n_{kz}), \quad z = \overline{1, Z}. \quad (5)$$

Таким образом, получив алгоритм вычисления значений зависимостей (2), можно выполнить совмещение снимков и получить новые спектрональные изображения  $D_k = \{d_k(m, n)\}$  в единой системе координат. Однако, пересчет каждого пикселя исходного снимка в систему координат базового займет значительное время. Поэтому для ускорения процесса совмещения снимков по аналитической модели (2) функции  $F_k^*$ ,  $\Phi_k^*$  представляются в кусочно-билинейном виде. В таком виде аналитическая модель применяется для комплексирования снимков от МСУ-50/100, устанавливаемом на планируемом к запуску КА «Метеор-М» №1.

Для геометрического совмещения снимков высокого разрешения модели (2) недостаточно, т.к. из-за ошибок определения параметров внешнего и внутреннего ориентирования и рельефа местности погрешности вычисления координат одноименных точек снимков могут достигать десятков и сотен пикселей. Поэтому при совмещении снимков высокого пространственного разрешения используется двухэтапный подход, в соответствии с которым вначале выполняется оперативное совмещение снимков по полиномиальной модели с учетом углового движения КА, а затем прецизионное совмещение с использованием триангуляционной модели, учитывающей рельефные искажения.

Параметры полиномиальной модели определяются на основе координат одноименных точек спектрональных снимков. Для их поиска в условиях неизвестного пространственного рассогласования изображений  $B_k$  предлагается пирамидальный алгоритм поиска одноименных сюжетов. В соответствии с этим алгоритмом в углах снимка определяются информативные фрагменты, подходящие для дальнейшего корреляционно-экстремального отождествления (КЭО). Далее, формируется пирамида разномасштабных фрагментов  $\tilde{B}_{k\phi S}^*$ ,  $s = \overline{1, S}$ ,

$$B_{k\phi}^* = \tilde{B}_{k\phi 1}^* \xrightarrow{\Psi_2} \tilde{B}_{k\phi 2}^* \xrightarrow{\Psi_3} \dots \xrightarrow{\Psi_S} \tilde{B}_{k\phi S}^*, \quad (6)$$

где  $\Psi$  – оператор масштабного преобразования с коэффициентом  $\mu_s$ . Идея алгоритма состоит в том, что если на нижнем уровне пирамиды наблюдается рассогласование  $\ell$  пикселей, то на верхнем уровне пирамиды это рассогласование равноется

$$\ell / \prod_{s=2}^S \mu_s \text{ пикселей, т.е. можно значительно}$$

сократить время вычисления корреляционной функции за счет сокращения области поиска на следующем уров-

не пирамиды. Далее, определив на основе КЭО взаимные смещения на нулевом уровне пирамиды, строится полиномиальная модель взаимного соответствия спектрональных изображений:

$$\begin{aligned} \widehat{B}_k &= \{ \widehat{b}_k(m, n) = b_k(m_k, n_k) \}, \\ m_k &= P_{mk}(m, n) = p_{0k} + p_{1k}m + p_{2k}n, \\ n_k &= P_{nk}(m, n) = p_{3k} + p_{4k}m + p_{5k}n, \end{aligned} \quad (7)$$

где  $\widehat{B}_k$  – геометрически преобразованные в систему координат  $(m, n)$  снимки  $B_k$ . При этом коэффициенты полиномов  $P_{mk}$ ,  $P_{nk}$  определяются по идентифицированным координатам одноименных точек с использованием метода наименьших квадратов.

По модели (7) можно совместить снимки высокого разрешения равнинной местности с точностью 2-3 пикселя. В процессе исследований выяснилось, что на взаимные рассогласования изображений высокого разрешения также влияют изменения углов ориентации КА во время съемки, и модель (7) не всегда оказывается адекватной. На протяженных маршрутах, при наличии значительного углового движения, взаимные рассогласования снимков могут достигать десятков пикселей. В связи с этим модель (7) с учетом изменения углов ориентации КА представляется в виде:

$$\begin{aligned} m_k &= p_{k0} + p_{k1}[m + C_{mk}(n)] + p_{k2}[n + C_{nk}(n)], \\ n_k &= p_{k3} + p_{k4}[m + C_{mk}(n)] + p_{k5}[n + C_{nk}(n)], \quad k = 1, 3, \end{aligned} \quad (8)$$

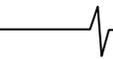
где  $C_{mk}(n)$ ,  $C_{nk}(n)$  – взаимные смещения совмещаемых снимков  $B_k$  относительно базового в строчном и кадровом направлениях, вызванные угловым движением КА. Эти смещения определяются на основе угловых скоростей КА:

$$\begin{aligned} C_{mk}(n) &\approx \frac{f[\Delta\omega(t, \Delta t_k) - \Delta\omega(t_0, \Delta t_k)]}{r}, \\ C_{nk}(n) &\approx \frac{f[\Delta\alpha(t, \Delta t_k) - \Delta\alpha(t_0, \Delta t_k)]}{r}, \end{aligned} \quad (9)$$

где  $f$  – фокусное расстояние съемочного устройства,  $r$  – размер фотоэлемента линейки ПЗС,  $\Delta\omega(t, \Delta t_k)$ ,  $\Delta\alpha(t, \Delta t_k)$  – изменение угла крена и тангажа от момента времени  $t_0$  до  $\Delta t_k$ ,  $t_0$  – момент времени формирования первой строки изображения базового ОЭП,  $\Delta t_k$  – временной интервал между съемкой одноименных объектов местности соседними ОЭП.

На рис.1 показан пример совмещения маршрута съемки «Париж» по модели (7) (рис. 1, а) и по модели (8) (рис. 1, б). В центре снимка (рис. 1, а) видны рассогласования достигающие сотни пикселей, на рис. 1, б эти рассогласования устранены.

После совмещения по модели (8) могут остаться взаимные рассогласования, обусловленные главным образом рельефом местности. Для устранения указанных рассогласований используется триангуляционная модель геометрического соответствия, в соответствии с которой плоскость совмещаемого снимка разбивается на треугольные фрагменты, в пределах которых координатная обработка выполняется по линейному закону. Например, для изображения  $B_1$  в пределах треугольника с порядковым номером  $u$  соотношения выглядят следующим образом:



$$m_1 = a_{u_0} + a_{u_1}m + a_{u_2}n, \quad n_1 = a_{u_3} + a_{u_4}m + a_{u_5}n. \quad (10)$$

Вершинами триангуляционной решетки являются идентифицированные на изображениях  $\hat{B}_1, \hat{B}_2, \hat{B}_3$  одноименные точки. Изначально точки на базовом снимке формируются в узлах регулярной прямоугольной решетки с шагом, позволяющим аппроксимировать с заданной точностью соотношения (8). При этом их образы на изображениях  $\hat{B}_1$  и  $\hat{B}_3$  определяются с использованием аналитико-регрессионной модели, а потом уточняются с использованием аппарата КЭО. Разбиение плоскости на треугольники

выполняется по критерию Делоне [2].

Далее триангуляционная модель автоматически загущается до требуемой точности совмещения, которая как правило составляет 0,5 пикселя. На рис. 2 показан маршрут «Тегеран», совмещенный с использованием регулярной триангуляционной сети (рис. 2, а) и сети, загущенной с учетом рельефа местности (рис. 2, б). Из рис. 2, б видно, что триангуляционная сеть загущается на горных районах маршрута, а на относительно ровных участках остается без изменения.

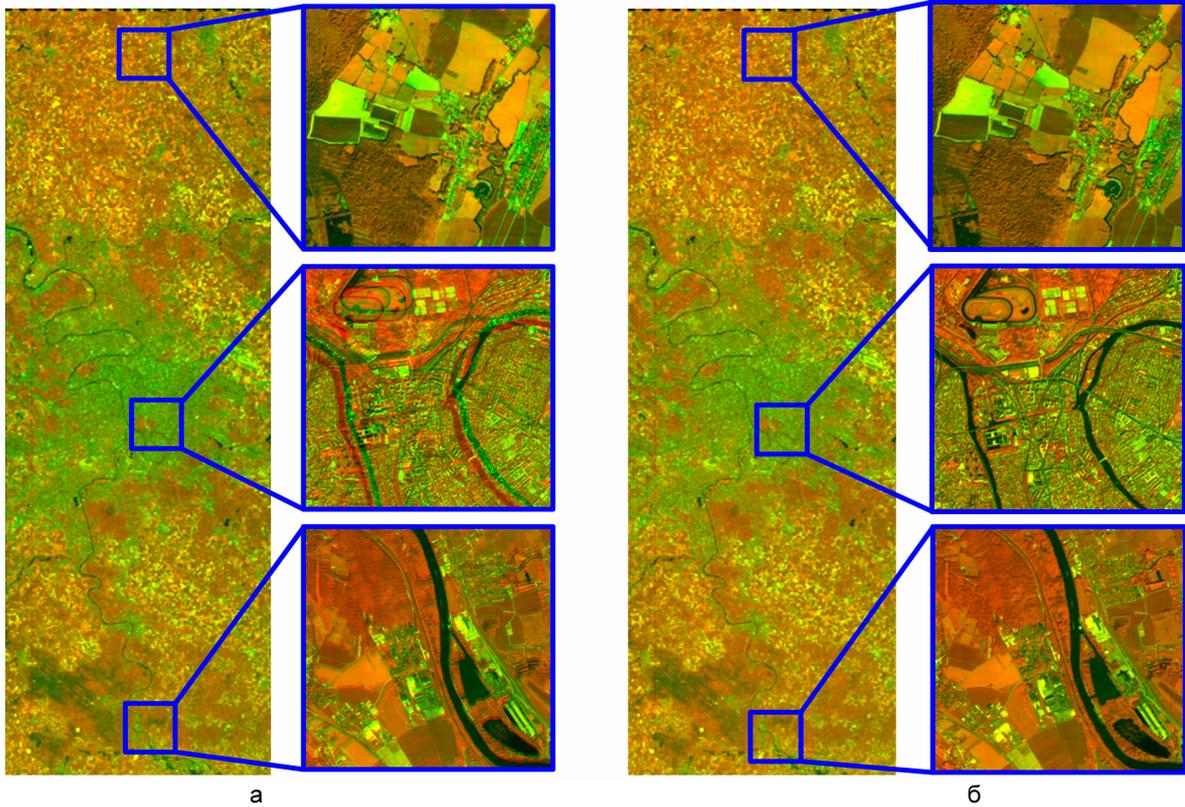


Рис. 1. Пример совмещения двух снимков: а – без учета изменения углов ориентации КА, б – с учетом изменения углов ориентации

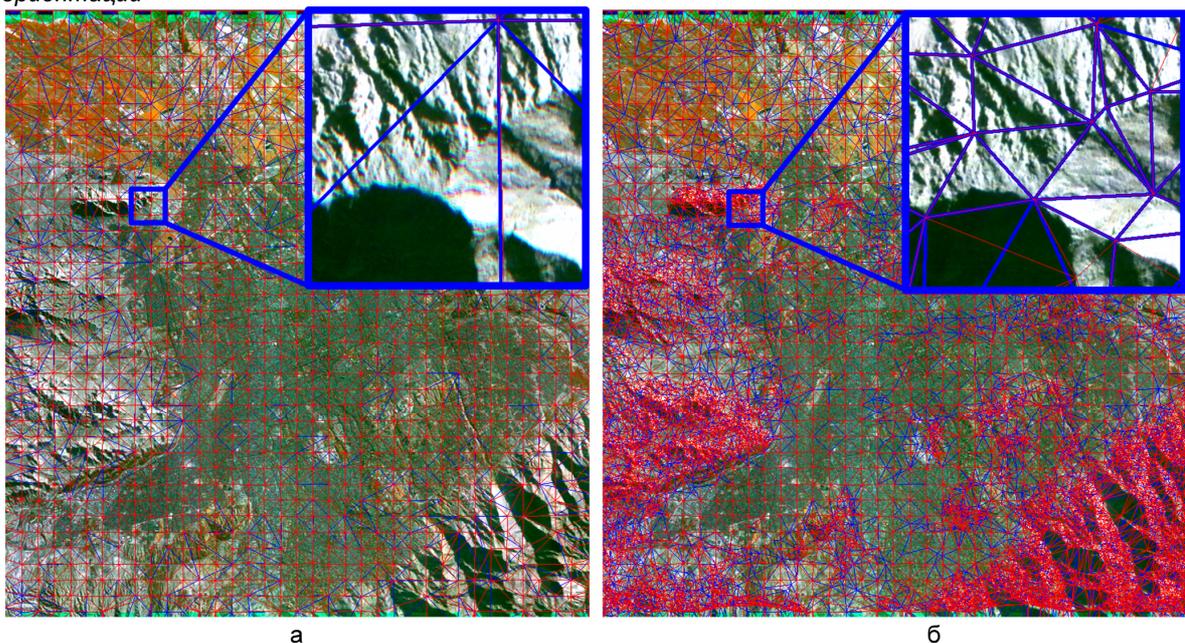


Рис. 2. Маршрут «Тегеран», совмещенный по триангуляционной модели: а – регулярная сетка, б – сетка, загущенная с учетом рельефа местности

Для повышения надежности корреляционно-экстремальной идентификации, в частности, для отбраковки точек, попавших на движущиеся объекты, предложен следующий алгоритм.

Установлено, что перепады высот снимаемых объектов влияют на рассогласования в кадровом направлении и практически не оказывают влияния на рассогласования в строчном направлении. Соответственно строчные смещения совмещаемого снимка относительно базового в одноименных точках местности распределены по нормальному закону, а одноименные точки, попавшие на движущиеся объекты, можно отбраковать по их строчным смещениям по критерию «3σ». На рис. 3 приведен пример смещений Δm в строчном направлении. На рис. 3,а видно два пика, которые образованы точками, попавшими на движущиеся объекты. На рис. 3,б показан результат отбраковки одноименных точек, попавших на движущиеся объекты.

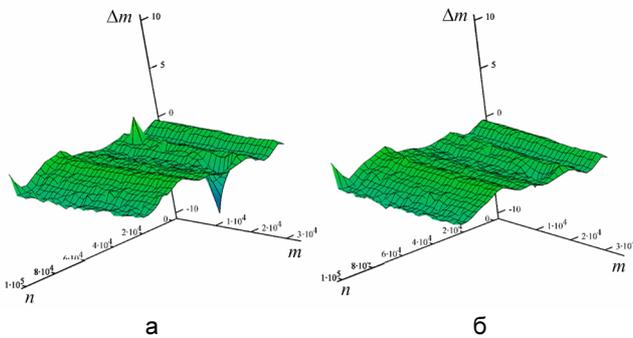


Рис. 3. Графики строчных смещений одноименных точек: а – смещения до отбраковки движущихся объектов, б – после отбраковки

**Радиометрическое комплексирование спектральных снимков**

Съемка тремя ОЭП не всегда выполняется в спектральных диапазонах, соответствующих «красной», «зеленой» и «синей» области спектра. Например, на КА «Ресурс-ДК» вместо «зеленой» может выполняться съемка в широкой панхроматической области спектра, поэтому при создании цветосинтезированного изображения необходимо восстановить недостающие компоненты.

Если в режиме RGB-съемки компоненты цветного снимка остаются неизменными, то в режиме RPB-съемки компоненты будут формироваться в соответствии с выражениями:

$$D_R = \hat{B}_3, D_G = 3B_2 - \hat{B}_1 - \hat{B}_3, D_B = \hat{B}_1 \quad (11)$$

где  $D_R, D_G, D_B$  – красная, зеленая и синяя компоненты цветосинтезированного изображения  $D$ , соответственно, в режиме PGB-съемки аналогично:

$$D_R = 3\hat{B}_3 - \hat{B}_1 - B_2, D_G = B_2, D_B = \hat{B}_1. \quad (12)$$

При отсутствии снимка от одного из ОЭП и наличии снимка панхроматического диапазона компоненты цветного снимка вычисляются на основе предположения, что гистограмма естественной сцены аппроксимируется полиномом третьей степени.

BP-съемка:

$$D_R = \beta_0 + \beta_1 \hat{B}_1 + \beta_2 \hat{B}_1^2 + \beta_3 \hat{B}_1^3, D_G = 3B_2 - \hat{B}_1 - D_R, D_B = \hat{B}_1, \quad (13)$$

где  $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3$ , – коэффициенты полинома 3-й степени, вычисленные по гистограмме изображения  $\hat{B}_1$ .

PR-съемка:

$$D_R = \hat{B}_3, D_G = 3B_2 - D_B - \hat{B}_3, D_B = \beta_4 + \beta_5 \hat{B}_3 + \beta_6 \hat{B}_3^2 + \beta_7 \hat{B}_3^3, \quad (14)$$

где  $\beta_4, \beta_5, \beta_6, \beta_7$ , – коэффициенты полинома 3-й степени, вычисленные по гистограмме изображения  $B_3$ .

GP-съемка:

$$D_R = 3\hat{B}_3 - D_B - B_2, D_G = B_2, D_B = \beta_8 + \beta_9 B_2 + \beta_{10} B_2^2 + \beta_{11} B_2^3, \quad (15)$$

где  $\beta_8, \beta_9, \beta_{10}, \beta_{11}$  – коэффициенты полинома 3-й степени, вычисленные по гистограмме изображения  $B_2$ .

Вследствие того, что спектрозональные снимки являются разновременными, движущиеся объекты представляются на них как три разноцветных объекта (рис.4, а). Для устранения влияния движущихся объектов на качество снимка был предложен модуляционный алгоритм радиометрического комплексирования, который функционирует при наличии панхроматического снимка. Работу модуляционного алгоритма можно разделить на два этапа. На первом этапе выполняется «размытие» спектрозональных компонент в соответствии с формулами

$$\hat{B}_1^* = \hat{B}_1 \otimes h_{j \times j}, \hat{B}_3^* = \hat{B}_3 \otimes h_{j \times j}, \quad (16)$$

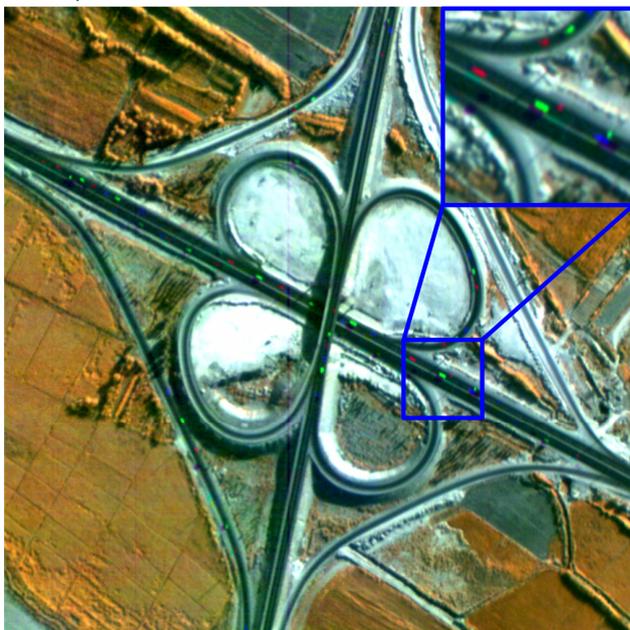
где  $\otimes$  – операция свертки с маской размытия  $h$  размером  $j \times j$  элементов. На втором этапе получаем компоненты цветосинтезированного изображения с использованием модуляции панхроматической компоненты синей и красной компонентами по формулам:

$$D_R = \frac{3\hat{B}_3^*}{B_2 + \hat{B}_1^* + \hat{B}_3^*} B_2, D_G = B_2, D_B = \frac{3\hat{B}_1^*}{B_2 + \hat{B}_1^* + \hat{B}_3^*} B_2. \quad (17)$$

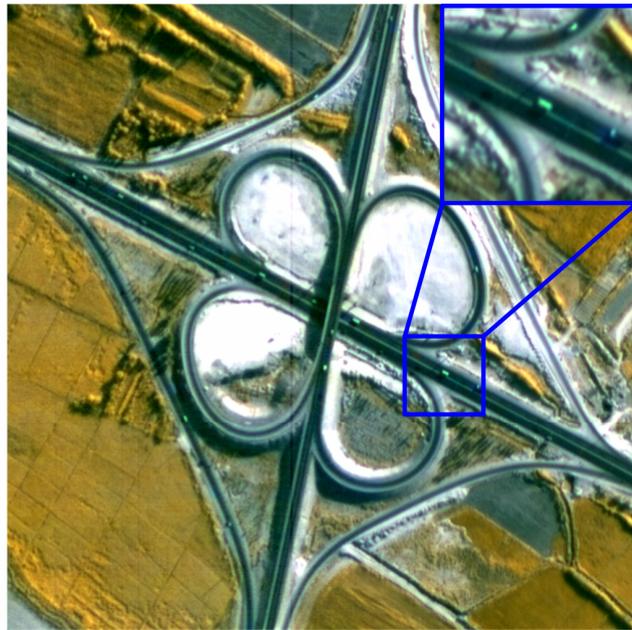
Указанный алгоритм позволяет также устранить остаточные рассогласования 1-2 пикселя от высотных объектов (башен, небоскребов). Результат работы модуляционного алгоритма представлен на рис. 4,б.

**Заключение**

Рассмотренные в статье алгоритмы геометрического и радиометрического комплексирования легли в основу программных модулей создания цветосинтезированных изображений в ряде программных комплексов обработки видеоданных от отечественных КА, таких как «Метеор-М» №1 и «Ресурс-ДК». При этом для снимков среднего разрешения используется аналитическая модель геометрического соответствия, а в случае совмещения снимков высокого разрешения применяется аналитико-регрессионная и триангуляционная модели. Эффективность предложенных решений подтверждается многолетней успешной эксплуатацией разработанных программных комплексов.



а



б

Рис. 4. Пример маскирования движущихся объектов: а – исходный снимок, б – снимок, полученные с использованием модуляционного алгоритма

#### Литература

1. Обработка изображений в геоинформационных системах: Учебное пособие / В.К.Злобин, В.В.Еремеев, А.Е.Кузнецов. Рязан. Гос. Радиотехн. Университет, Рязань, 2006. 264 с.
2. Скворцов А.В. Триангуляция Делоне и ее применение. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2002. – 128 с.
3. Бакланов А.И. Системы наблюдения и мониторинга: учебное пособие / А.И. Бакланов. - М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009. 234с. : ил.

#### FORMING COLOR IMAGES FROM REMOTE SENSING DATA MEDIUM AND HIGH SPATIAL RESOLUTION

*Kuznetsov A.E., Svetelkin P.N.*

Models geometric and radiometric fusion of remote sensing data medium and high spatial resolution for getting color images is consider

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

#### ИНФОРМАЦИОННОЕ ПИСЬМО

*Уважаемый коллега!*

*Приглашаем Вас принять участие в работе 12-ой Международной конференции и выставки «Цифровая обработка сигналов и ее применение – DSPA'2010», которая состоится в Москве в ИПУ РАН 24-26 марта 2010 года*

#### ОРГАНИЗАТОРЫ:

- Российское научно-техническое общество радиотехники, электроники и связи им. А.С. Попова
- IEEE Signal Processing Society
- Российская секция IEEE
- Институт радиотехники и электроники РАН
- Институт проблем управления РАН
- Институт проблем передачи информации РАН
- Московский научно-исследовательский телевизионный институт
- Компания AUTEX Ltd. (АВТЭКС)

#### ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАБОТЫ КОНФЕРЕНЦИИ:

- Теория сигналов и систем
- Теория и методы ЦОС
- Цифровая обработка многомерных сигналов
- Цифровая обработка речевых и звуковых сигналов
- Цифровая обработка изображений
- ЦОС в системах телекоммуникаций
- ЦОС в радиотехнических системах
- ЦОС в системах управления и робототехники
- Цифровая обработка измерительной информации
- Нейрокомпьютерная обработка сигналов и изображений
- Цифровое телевидение и телевидение
- Цифровое радиовещание
- ЦОС в системах защиты информации
- Проектирование и техническая реализация систем ЦОС
- ЦОС в открытых системах
- Проблемы подготовки специалистов в области ЦОС