

УДК 004.932

НОРМАЛИЗАЦИЯ КОСМИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ЗЕМЛИ НА ОСНОВЕ ИХ СОПОСТАВЛЕНИЯ С ЭЛЕКТРОННЫМИ КАРТАМИ

Егошкин Н.А., к.т.н., с.н.с. НИИ «Фотон» Рязанского государственного радиотехнического университета (РГРТУ), gislab@org.etr.ru

Еремеев В.В., д.т.н., директор НИИ «Фотон» РГРТУ, foton@rgta.ryazan.ru

Козлов Е.П., м.н.с. НИИ «Фотон» РГРТУ

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, геостационарный спутник, нормализация изображений, электронная карта, автоматическое совмещение, координатная привязка

Введение

В практике дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) в последние годы стали внедряться геостационарные космические системы: MeteoSat (Европа), GOES (США), FY (Китай) и др. В настоящее время готовится к запуску российский геостационарный спутник «Электро-Л», который планируется включить в международную космическую систему наблюдения всей земной поверхности. Геостационарные спутники выводятся на орбиту, находящуюся в плоскости экватора, на высоту порядка 35000 км. При этих условиях спутник «зависает» на заданной долготе и обеспечивает периодическую съемку одной и той же поверхности всего земного диска на фоне окружающего космоса (рис. 1). Погрешности измерений пространственного положения и углов ориентации спутника приводят к тому, что изображение диска Земли искажается, прежде всего смещается в регистрационной системе координат, поворачивается и изменяет масштаб. Стоит задача с использованием тех или иных технологий выполнить нормализацию изображения, т.е. привести его к стандартным положению и размерам.

Известные технологии нормализации изображений по звездному небу и наземным ориентирам [1] не обеспечивают необходимой точности, оперативности и надежности решения рассматриваемой задачи. В последние годы появились векторные электронные карты различного масштаба, и делаются активные попытки их использования для координатной обработки данных ДЗЗ, полученных от полярно-орбитальных космических аппаратов, которые осуществляют съемку Земли, вращаясь вокруг нее. Но полностью автоматических технологий решения этой задачи еще не создано [2-4]. Основная трудность состоит в постоянном изменении географического района съемки, условий наблюдения, в выборе устойчивых во времени наземных ориентиров.

Задача нормализации изображений от геостационарных спутников значительно упрощается: они осуществляют съемку одного и того же района земной поверхности; на снимках четко отображаются береговые линии морей, крупных озер и островов, которые устойчивы во времени и представлены в соответствующих электрон-

Рассматриваются алгоритмы и технология нормализации изображений от геостационарных спутников на основе двух подходов. Первый базируется на автоматическом совмещении уникальных фрагментов береговых линий снимка с бинарными масками, формируемыми по электронным картам. Вторым подходом основан на эталонном описании контура диска Земли в специально введенной плоскости и сопоставлении этого описания с реально наблюдаемым на снимке. Предложены алгоритмы повышения точности и надежности решения этой задачи.

ных картах. Кроме этого, снимки от геостационарных спутников (по отношению к полярно-орбитальным) предоставляют уникальную возможность их координатной привязки по контурным точкам диска Земли, которые контрастно и неизменно отображаются на фоне окружающего космоса.

Все это создает предпосылки для создания полностью автоматической технологии высокоточной нормализации космических изображений от геостационарных спутников по электронным картам и контурным точкам диска Земли.

Общая технология координатной привязки

В настоящей работе рассматривается технология надежной координатной привязки, предполагающая реализацию трех основных процессов. Во-первых, на снимке выделяются опорные объекты, которые имеют уникальную геометрическую форму и устойчивы во времени. Для этих объектов на основе ЭК формируются бинарные маски, соответствующие по яркости и геометрической форме аналогичным объектам снимка. Во-вторых, выполняется корреляционное совмещение бинарных масок с одноименными объектами снимка, на основе чего определяются функции геометрического соответствия снимка и карты. В-третьих, на изображении контурные точки диска Земли преобразуются во вспомогательную плоскость. В этой плоскости они образуют эталонный эллипс, который рассматривается как дополнительный элемент ЭК. На основе сопоставления реально наблюдаемого контура с его эталонным описанием решается задача предварительного определения функций геометрического соответствия снимка и карты, что позволяет значительно сузить зоны поиска одноименных фрагментов снимка и карты. Рассмотрим конкретное содержание этих этапов.

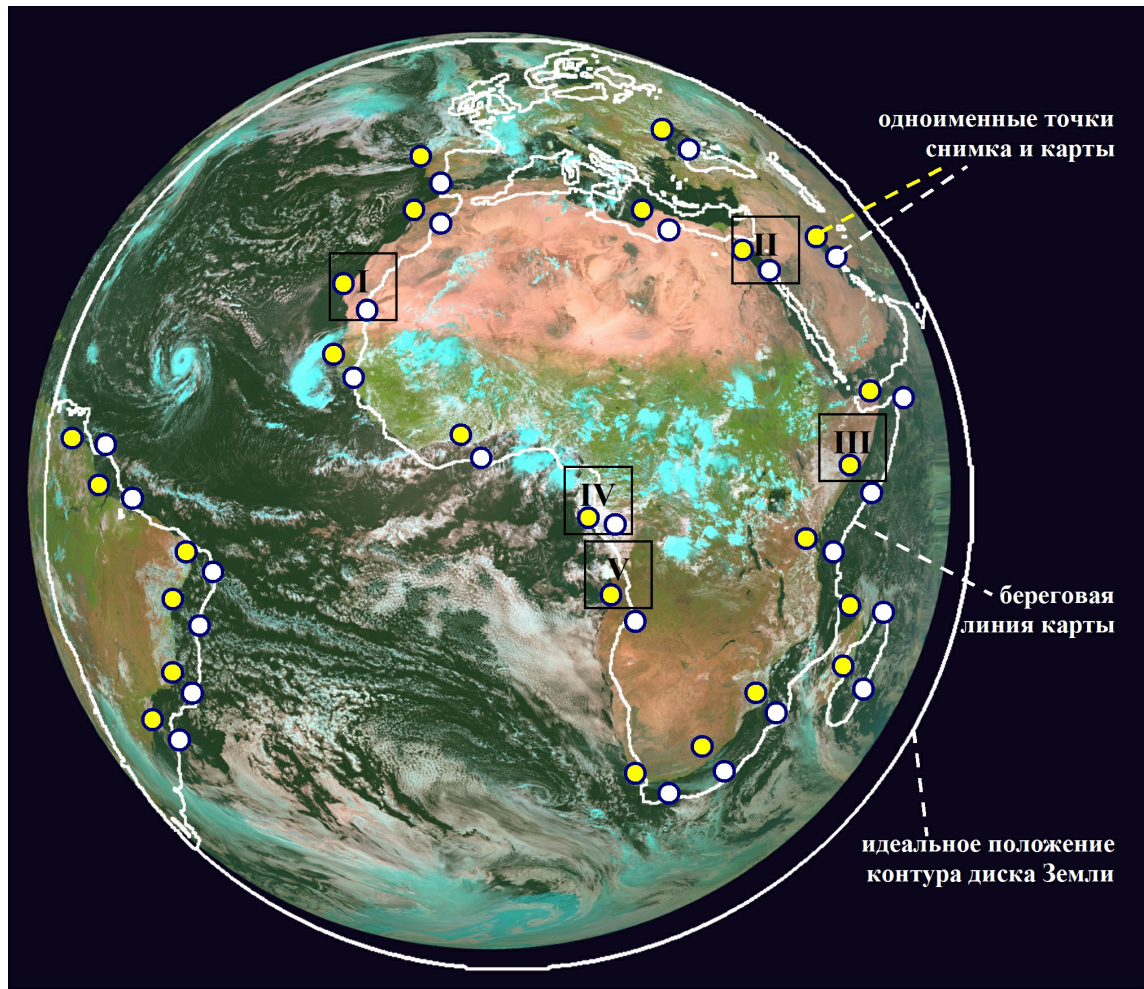


Рис. 1. Изображение диска Земли на фоне окружающего космоса и электронной карты

Формирование бинарных масок. На наблюдаемую часть земного диска из электронной карты отбираются уникальные опорные объекты, соответствующие объектам снимка (рис. 2, слева; фрагмент I на рис. 1), в виде изломов береговых линий и преобразуются из векторного формата в растровый. Степень уникальности опорных фрагментов $E_i = \{(x_j, y_j); j = \overline{1, J}\}, i = \overline{1, I}$, определяется среднеквадратичным отклонением $\sigma_i, i = \overline{1, I}$, береговой линии, содержащей точки $(x_j, y_j), j = \overline{1, J}$, от прямой $y = k_i x + b_i$:

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

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

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

Эталонное положение фрагментов определяется их центрами $(x_{0i}, y_{0i}), i = \overline{1, I}$. Для каждого $E_i, i = \overline{1, I}$, формируется бинарная маска $A_i, i = \overline{1, I}$, в виде двух областей, линия соприкосновения которых совпадает с электронной картой; яркости (нулевая и единичная) соответствуют расположению водной и земной поверхностей на снимке (рис. 2, справа). Для каждого опорного фрагмента формируется набор бинарных масок разной ширины для увеличения надежности совмещения фрагмента снимка и маски. Затем с помощью фрагментов

$E_i, i = \overline{1, I}$, с центрами $(x_{0i}, y_{0i}), i = \overline{1, I}$, формируются зоны поиска в виде расширенных фрагментов снимка $B_i, i = \overline{1, I}$, с очертаниями береговых линий E_{Bi} (см. рис. 2). На рис. 2 и далее индекс i для простоты опущен.

Корреляционное совмещение снимка с картой. С учетом бинарного представления маски A при нахождении коэффициента корреляции

$$\rho = (\overline{BA} - \overline{B} \overline{A}) / \sqrt{D_B D_A} \quad (2)$$

не требуется вычислять среднее значение произведений одноименных элементов изображения и маски \overline{BA} , средних яркостей $\overline{A}, \overline{B}$ и дисперсий D_A, D_B , и (2) можно представить как

$$\rho = \frac{\overline{B_1} - \overline{B_0}}{\sqrt{D_B}} \cdot \frac{\sqrt{q_1 q_0}}{q_1 + q_0}, \quad (3)$$

где $\overline{B_1}, \overline{B_0}$ и q_1, q_0 - средние значения яркостей снимка и число точек под единичной и нулевой областями маски. При $q_1 = q_0$ вычисление ρ еще более упрощается:

$$\rho = 0.5(\overline{B_1} - \overline{B_0}) / \sqrt{D_B}. \quad (4)$$

В результате совмещения карты и снимка формируется множество одноименных точек $O = \{(x_i, y_i), (x_i^*, y_i^*); i = \overline{1, I}\}$, на основе которого по МНК определяются полиномы P_x, P_y , устанавливающие геометрическое соответствие снимка и карты.

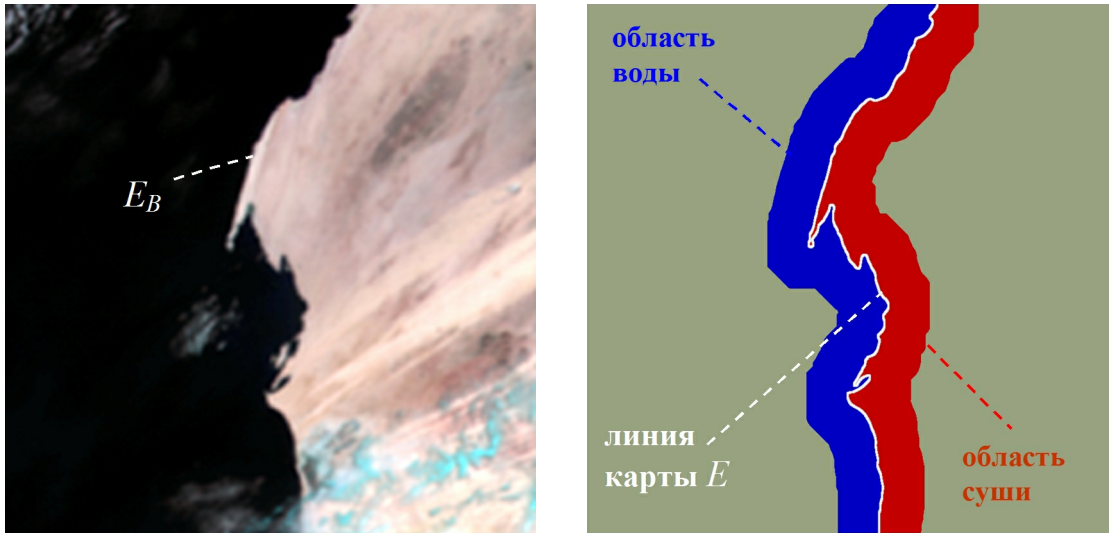


Рис. 2. Уникальный фрагмент снимка (слева) и бинарная маска (справа)

Коэффициенты этих полиномов находятся из условий:

$$\sum_i [P_x(x_i^*, y_i^*) - x_i]^2 = \min, \quad \sum_i [P_y(x_i^*, y_i^*) - y_i]^2 = \min. \quad (5)$$

Коэффициенты полиномов определяют смещение диска Земли по отношению к карте, масштабы по осям, поворот и другие искажения.

Координатная привязка по диску Земли. Выполняется сопоставление эталонного описания контура диска Земли с реально наблюдаемым. В идеальном случае в плоскости, которая перпендикулярна к линии, соединяющей центр Земли и центр масс спутника, крайние точки диска Земли (\tilde{X}, \tilde{Y}) образуют эллипс, а в реальных условиях занимают другое положение (X, Y) . Можно показать, что эталонный эллипс при номинальных параметрах съемки определяется как $\tilde{X}^2/a^2 + \tilde{Y}^2/b^2 = 1$,

$$a = a_3 \sqrt{\frac{X_0^2 b_3^2 + Y_0^2 b_3^2 + Z_0^2 a_3^2}{X_0^2 b_3^2 + Y_0^2 b_3^2 + Z_0^2 a_3^2 - a_3^2 b_3^2}},$$

$$b = \sqrt{\frac{X_0^2 b_3^4 + Y_0^2 b_3^4 + Z_0^2 a_3^4}{X_0^2 b_3^2 + Y_0^2 b_3^2 + Z_0^2 a_3^2 - a_3^2 b_3^2}};$$

(X_0, Y_0, Z_0) – координаты спутника; a_3, b_3 – экваториальный и полярный радиусы земного эллипсоида. Для реального эллипса оцениваются координаты центра $(X_{ц}, Y_{ц})$, размеры полуосей a_d, b_d и угол их наклона φ . Затем устанавливается геометрическое соответствие одноименных точек:

$$\tilde{X} = [(X - X_{ц}) \cos \varphi + (Y - Y_{ц}) \sin \varphi] a / a_d,$$

$$\tilde{Y} = [(Y - Y_{ц}) \cos \varphi - (X - X_{ц}) \sin \varphi] b / b_d. \quad (7)$$

Формулы (7), уточняя положение и размеры диска Земли, позволяют существенно сузить зоны поиска опорных объектов карты на снимке.

Повышение точности и надежности оценки параметров нормализации

При решении рассматриваемой задачи мешающее

действие оказывают такие факторы, как: наличие облучности, частично или полностью закрывающей опорные фрагменты береговых линий; неполное соответствие геометрии береговой линии на снимке и электронной карте; неравномерное распределение уникальных фрагментов по полю изображения. Рассмотрим ряд конструктивных решений, направленных на нейтрализацию действия этих факторов.

Построение ассиметричных масок. Исследование поведения ρ в окрестности области совпадения фрагмента снимка с маской показало, что при различной степени их геометрического сходства

$$\rho = \frac{1 - (\alpha + \beta)}{\sqrt{1 + 2(D_0 + D_1)/(\bar{B}_1 - \bar{B}_0) + 2(\alpha - \beta)(D_1 - D_0)/(\bar{B}_1 - \bar{B}_0)^2 - (\alpha - \beta)^2}}, \quad (8)$$

где α и β – доля элементов суши под нулевой областью маски и доля элементов водной поверхности под единичной областью («чужие» элементы), D_0 и D_1 – выборочные дисперсии изображения под нулевой и единичной областями бинарной маски.

Из (2) и (8) следуют два важных вывода. Во-первых, ρ зависит как от общего уровня «чужих» элементов, доля которых равна $(\alpha + \beta)$, так и от соотношения между α и β , определяемого в знаменателе членами с разностью $(\alpha - \beta)$. Во-вторых, член $\bar{B}A$ в (2), который должен определять меру сходства фрагмента снимка и маски, зависит только от β . $\bar{B}A$ достигает максимального значения $0,5 B_1$ при $B_1 > B_0$ и $\beta = 0$, когда элементы водной поверхности полностью отсутствуют под единичной областью маски. В результате центрирования и нормирования $\bar{B}A$ формируется коэффициент корреляции, числитель которого уже зависит от суммы $(\alpha + \beta)$, а знаменатель от разности $(\alpha - \beta)$; в результате точка наилучшего сходства в общем случае смещается.

Подобного рода ошибки могут быть устранены путем использования ассиметричных бинарных масок. В этом случае выражение (8) принимает следующий вид:

$$\rho = \frac{(1 - \alpha - \beta) \sqrt{q_0 q_1 / (q_0 + q_1)^2}}{\sqrt{\pi(1 - \pi) + \pi D_0 / (\bar{B}_1 - \bar{B}_0)^2 + (1 - \pi) D_1 / (\bar{B}_1 - \bar{B}_0)^2}}, \quad (9)$$

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

Максимальное значение ρ достигается при

$$q_0 = \frac{q_0 + q_1}{1 + \sqrt{\frac{D_0 + \alpha(\overline{B}_1 - \overline{B}_0)^2}{D_1 + \beta(\overline{B}_1 - \overline{B}_0)^2}}}. \quad (10)$$

Только при полном совпадении E с E_B , т.е. при $\alpha = \beta = 0$, ошибка отсутствует, и $\rho = \rho_{\max}$ при несимметричной 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 $D_0 = D_1$.

Компенсация систематических ошибок. Такие ошибки обусловлены несовпадением береговых линий на снимке и карте (рис. 3, фрагмент II на рис. 1).



Рис. 3. Несовпадение береговой линии на снимке и карте

Ошибки определения ОТМ, связанные с несовпадением береговой линии на снимке и карте, от сеанса к сеансу съемки повторяются и устраняются с помощью следующего алгоритма.

По описанной выше технологии для изображения $B(x, y)$ формируются полиномы геометрического соответствия снимка и карты P_x, P_y . Далее в полиномы P_x, P_y вводится серия искажений $\Omega_{xs}, \Omega_{ys}, s = \overline{1, S}$, определяющих различные повороты и смещения изображения по отношению к ЭК. В результате формируется набор полиномов $P_{xs} = P_x + \Omega_{xs}, P_{ys} = P_y + \Omega_{ys}, s = \overline{1, S}$. По этим полиномам изображение $B(x, y)$ преобразуется в серию изображений $B_s(x, y), s = \overline{1, S}$; при этом P_x, P_y «работают» на совмещение одноименных фрагментов снимка и карты, а $\Omega_{xs}, \Omega_{ys}, s = \overline{1, S}$, вносят рассогласования. Затем $B_s(x, y), s = \overline{1, S}$, совмещаются с ЭК, в результате чего определяются центральные точки фрагментов изображения $(x_{is}, y_{is}), i = \overline{1, I}, s = \overline{1, S}$. Эти точки преобразуются по обратным полиномам $\Omega_{xs}^{-1}, \Omega_{ys}^{-1}, s = \overline{1, S}$, в плоскость изображения $B(x, y)$, образуя набор точек $(x_{is}^*, y_{is}^*), i = \overline{1, I}, s = \overline{1, S}$. В результате формируются смещения $\Delta x_{is} = x_{is} - x_{is}^*, \Delta y_{is} = y_{is} - y_{is}^*, i = \overline{1, I}, s = \overline{1, S}$, их средние значения

$$\Delta x_i = \frac{1}{S} \sum_{s=1}^S \Delta x_{is}, \Delta y_i = \frac{1}{S} \sum_{s=1}^S \Delta y_{is}$$

и СКО

$$\sigma_{xi} = \sqrt{\frac{1}{S} \sum_{s=1}^S \Delta x_{is}^2 - (\Delta x_i)^2},$$

$$\sigma_{yi} = \sqrt{\frac{1}{S} \sum_{s=1}^S \Delta y_{is}^2 - (\Delta y_i)^2}, i = \overline{1, I}.$$

Величины $\Delta x_i, \Delta y_i, i = \overline{1, I}$, характеризуют систематические ошибки по осям x и y , обусловленные несовпадением по геометрии береговых линий снимка и карты, и могут служить поправками к координатам $x_i, y_i, i = \overline{1, I}$. Величины σ_{xi} и $\sigma_{yi}, i = \overline{1, I}$, характеризуют случайные составляющие ошибки совмещения одноименных фрагментов. Экспериментально установлено, что СКО оценки систематических ошибок не превышает 0.2 пикселя.

Учет уникальности опорных фрагментов. Уникальные фрагменты карты неравномерно расположены по снимку, а их число ограничено и измеряется несколькими десятками. Ставится задача расширить набор опорных фрагментов за счет тех, которые содержат почти прямолинейные береговые линии (рис. 4, слева; фрагмент III на рис. 1).

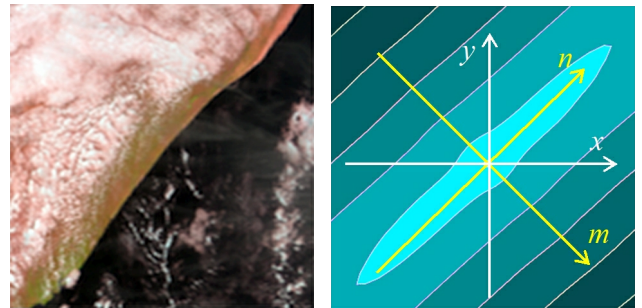


Рис. 4. Фрагмент снимка с линейной береговой линией (слева) и его АКФ

Установлено, что изолинии автокорреляционной функции (АКФ) опорных фрагментов имеют форму, близкую к эллипсу, направления осей m и n которого определяются ориентацией береговой линии (рис. 4, справа). Этот факт дает основание учитывать направления наилучшего (ось m) и наихудшего (ось n) совмещения для всех опорных фрагментов и к найденным ОТМ относиться с разной степенью доверия по осям m и n . В этом случае геометрическое соответствие снимка и карты находится из условий:

$$\sum_{i=1}^I (K_{ni} \Delta n_i^2) = \min, \sum_{i=1}^I (K_{mi} \Delta m_i^2) = \min, \quad (11)$$

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

$$\Delta n_i = [P_x(x_i, y_i) - x_i] \cos \alpha_i - [P_y(x_i, y_i) - y_i] \sin \alpha_i,$$

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

Углы ориентации АКФ и параметры «округлости» можно найти методом главных компонент. Для этого определяются собственные числа $\lambda_j, j = \overline{1, 2}$, $\lambda_1 \geq \lambda_2$, и собственные вектора e_{ij} матрицы вторых моментов. После этого осуществляется переход к ортогональным некоррелированным координатам m и n :

$$\begin{bmatrix} n \\ m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_{11} & e_{12} \\ e_{21} & e_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}. \quad (12)$$

Отношение λ_1/λ_2 характеризует, насколько изолиния АКФ в форме эллипса приближается к окружности. Конкретные значения коэффициентов остроконечности АКФ вдоль осей m и n , используемые в (11), находятся как

$$K_m = (\epsilon_m + 3)\sigma_m \lambda_2, \quad K_n = (\epsilon_n + 3)\sigma_n \lambda_1, \quad (13)$$

где ϵ_m, ϵ_n и σ_m, σ_n – эксцессы и СКО, найденные в окрестности максимума АКФ и позволяющие сравнить остроту вершин срезов АКФ вдоль осей m и n .

В конечном счете алгоритм дает возможность использовать для координатной привязки фрагменты, содержащие линейные участки береговых линий. Экспериментально установлено, что за счет этого набор опорных фрагментов расширяется примерно на 30%, что позволяет более плотно покрыть всю область определения снимка и снизить погрешность его совмещения с картой до 0.2 - 0.4 пикселя.

Идентификация облачности на водных участках. Наличие облачности в зоне поиска (рис. 5, сверху; фрагмент IV на рис. 1) приводит к ошибкам совмещения снимка и карты.

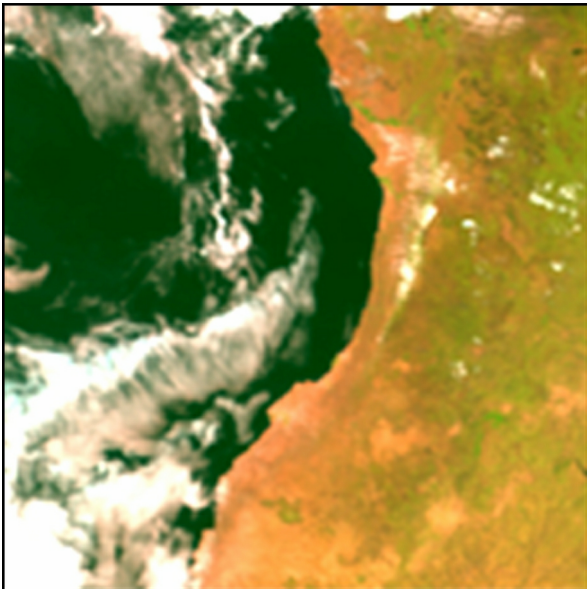


Рис. 5. Устранение облачности на водных участках

Нейтрализация этого фактора основана на двух предпосылках. Во-первых, зоны поиска содержат единственную береговую линию, разделяющую воду и сушу, которая от сеанса к сеансу съемки может смещаться в двух направлениях. Во-вторых, облачные образования представляют собой связанные области, яркость которых всегда выше яркости пикселей водной поверхности.

С учетом этого в зоне поиска определяются три области (рис. 5, снизу): L – область гарантированного участка суши; W – область гарантированного участка водной поверхности; U – область, непосредственно прилегающая к береговой линии и содержащая как участки суши, так и участки воды. Области строятся на основе знаний о допустимых диапазонах смещения береговой линии по осям x и y . На основе анализа гистограммы в области U решается задача сегментации на две подобласти: U_0 – элементы водной поверхности и U_1 – элементы суши. Далее формируется объединенная область элементов водной поверхности $W^* = W \cup U_0$ и находятся элементы, принадлежащие облачным образованиям, окруженные элементами W^* .

В результате этих операций области водной поверхности, закрытые облаками, восстанавливаются (рис. 5, снизу) при сохранении береговых линий. Экспериментально установлено, что алгоритм позволяет на 20-30% снизить число ложных совмещений, вызванных частичным закрытием облаками водных участков опорных фрагментов.

Отбраковка участков береговых линий, закрытых облаками. Закрытый облаками участок береговой линии, составляющий часть фрагмента, отбраковывается при $q_{обл,0} / q_0 > K_{обл}$, где $q_{обл,0}$ – число облачных точек, q_0 – число нулевых точек бинарной маски, $K_{обл}$ – пороговое значение доли облачности. Определение $q_{обл,0}$ производится на основе пороговой сегментации изображения $G(x, y)$, находящегося под бинарной маской. Порогом является медианное значение яркости $med G(x, y)$, которое отделяет водную поверхность под нулевой частью маски от облачных образований.

Отбраковка участков с несовпадающими береговыми линиями снимка и карты. Выполнение этой операции основано на многокритериальном анализе наличия облачных образований и несовпадений береговых линий снимка и карты на отдельных участках опорного фрагмента и принятия решения об их использовании или отбраковке. В качестве критериев используются статистические характеристики водной и земной поверхностей (средняя яркость, дисперсия, АКФ и др.) и степень закрытия участка облаками. Бинарная маска разбивается на L участков $A_i = \{A_i^1, A_i^2, \dots, A_i^l\}$, $i = \overline{1, I}$ (рис. 6; фрагмент V на рис. 1).

В процессе совмещения A_i^l , $i = \overline{1, I}$, $l = \overline{1, L}$, с соответствующим участком снимка B_i^l , $i = \overline{1, I}$, $l = \overline{1, L}$, рассчитываются критерии отбраковки K_i , $i = \overline{1, I}$. Если участок не удовлетворяет хотя бы одному из критериев K_i , $i = \overline{1, I}$, то он отбраковывается (участки 2, 5 на рис. 6). На основе (3), с использованием не отбракованных участков (1, 3, 4 на рис. 6), рассчитывается коэффициент корреляции:

$$\rho^* = 0.5 \sum_{j=1}^J (\overline{B}_{1j} - \overline{B}_{0j}) / \sum_{j=1}^J \sqrt{D_{Bj}}. \quad (14)$$

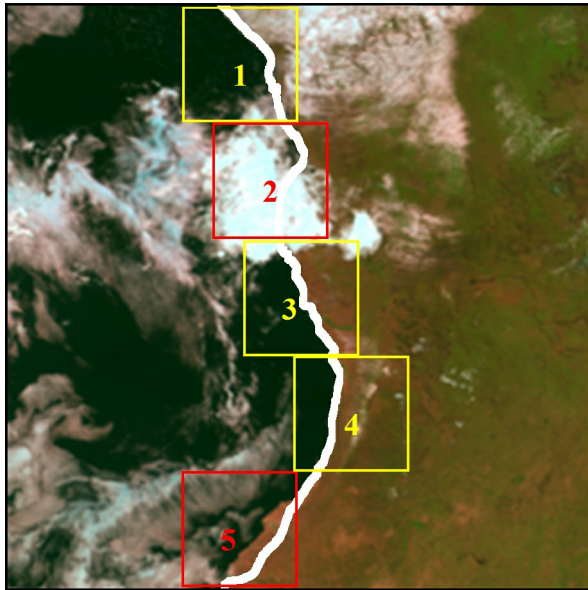


Рис. 6. Устранение участков с облаками (2) и не совпадающими границами (5)

Экспериментально установлено, что эта операция позволяет увеличить до 40% общее число опорных фрагментов и тем самым повысить точность совмещения снимка с картой.

Отбраковка ОТМ, найденных по ЭК. Эта операция основана на сопоставлении статистических характеристик водной поверхности и суши под бинарной маской.

Во-первых, ОТМ отбраковывается, если $B_0 > B_1$ и (или) $D_0 > D_1$.

Во-вторых, ОТМ отбраковывается, если $\rho_{\max} < \rho_0$ и (или) $\rho_{\max} / \rho^* < p$ и (или) $\sigma_\rho < \sigma_\rho^*$, где ρ_{\max} , ρ^* , ρ_0 - соответственно максимальное, следующее по величине в заданной области и пороговое значения коэффициента корреляции ρ ; σ_ρ , σ_ρ^* - соответственно СКО коэффициента корреляции и его пороговое значение.

Отбраковка ОТМ, найденных по контуру диска Земли. Эта операция основана на учете факта пространственной связности и близости контурных точек к некоторой линии, образующей эллипс. Здесь используются три критерия.

Краевые точки отбраковываются, если не удовлетворяют условию

$$R_{\min} - R_{\text{ц}} \leq r \leq R_{\max} + R_{\text{ц}}, \quad (15)$$

где $R_{\text{ц}}$ - радиус круга с центром (0, 0), определяющий допустимую область расположения центра эллипса, $[R_{\min}, R_{\max}]$ - допустимый диапазон изменения радиуса круга, r - расстояние от центра до контурной точки.

Далее исключаются участки контура, заведомо не имеющие отношения к краям диска, при одновременном выполнении условий

$$|\vartheta - \bar{\vartheta}| > 3\sigma_\vartheta, \quad |R - \bar{R}| > 3\sigma_R, \quad (16)$$

где ϑ - направление участка контура, R - радиус кривизны окружности, рассчитанный по окрестности рассматриваемой точки, $\bar{\vartheta}$, \bar{R} и σ_ϑ , σ_R - соответственно средние значения и СКО для ϑ и R .

Наконец, оставшиеся краевые точки бракуются, если

$$|r(\varphi) - \tilde{r}(\varphi)| > \bar{d} + 3\sigma_d, \quad (17)$$

где $r(\varphi)$, $\tilde{r}(\varphi)$ - соответственно эталонный эллипс и функция, построенная по реальным контурным точкам, в полярной системе координат $r\varphi$; \bar{d} и σ_d - среднее значение и СКО, найденные по множеству отчетов разности $r(\varphi) - \tilde{r}(\varphi)$.

Экспериментальные исследования

В ходе экспериментальных исследований получены следующие результаты.

- При нормализации изображений по электронным картам обеспечивается:
 - СКО погрешности порядка 0.2 - 0.5 пикселя;
 - предельная погрешность центральной точки диска Земли 0.7 пикселя;
 - решение поставленной задачи даже при 50%-м затенении изображения.

Эксперименты проводились с привлечением 62-х снимков от спутников «MeteoSat-5» и «MeteoSat-8». В каждом изображении использовалось по 53 ОТМ.

- При нормализации изображений по контурным точкам диска Земли даже при 80 % затенении диска Земли обеспечиваются точность оценивания углов крена и тангажа порядка 3 угл. с и угла рысканья порядка 200 угл. с., что позволило существенно сузить зону поиска ОТМ по электронным картам.

Эксперименты проводились с привлечением 120 изображений от спутника «MeteoSat-8».

- Время нормализации изображений по 53 опорным фрагментам составило 15 секунд, а по контурным точкам диска Земли - 10 секунд. Эксперименты выполнялись на серверной ЭВМ IBM x3850 с 4-мя двудерными процессорами Intel Xeon 7120N 4x3.0GHz / 667 MHz, обладающей оперативной памятью 8 Гбайт.

Литература

1. Злобин В.К., Еремеев В.В. Обработка аэрокосмических изображений. М.: Физматлит, 2006. 288 с.
2. Злобин В.К., Еремеев В.В., Федоткин Д.И. Информационная технология географической привязки космических изображений с использованием электронных карт // Исследование Земли из космоса. 2000. №1. С. 86-91.
3. Rosborough G.W., Baldwin D.G., Emery W.J. Precise AVHRR image navigation // IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens. 1994. 32. №3. P.644-657.
4. Mather P.M. Map-image registration accuracy using least-squares polynomials // Int.J. Geogr. Inform. Syst. 1995. 9. №5. P.543-554.

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