

УДК 004.932

В.В. Еремеев, Е.П. Козлов

АВТОМАТИЧЕСКАЯ КООРДИНАТНАЯ ПРИВЯЗКА ИЗОБРАЖЕНИЙ ОТ ГЕОСТАЦИОНАРНЫХ КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ НАБЛЮДЕНИЙ ЗЕМЛИ ПО ЭЛЕКТРОННЫМ КАРТАМ

Рассматривается технология геодезической привязки изображений от геостационарных спутников на основе автоматического совмещения уникальных фрагментов береговых линий, изображаемых на космических снимках, с бинарными масками, которые формируются из электронных карт и учитывают топологию береговых линий, а также яркостные свойства и взаимное расположение водной поверхности и суши.

Введение. Геостационарные спутники выводятся на орбиту, находящуюся в плоскости экватора, на высоту порядка 35000 км. При этих условиях спутник «зависает» на заданной высоте и обеспечивает периодическую съемку всего земного диска, содержащего одну и ту же часть поверхности Земли. В результате действия различных искажающих факторов (отклонения положения и высоты спутника от номинальных значений, изменение углов ориентации спутника и др.) положение диска Земли по отношению к средствам ее наблюдения изменяется. Это приводит к тому, что на формируемом в регистрационной системе координат изображении диск Земли смещается, изменяет свою ориентацию и размеры. Стоит задача приведения полученных изображений Земли к стандартному положению и масштабу, т.е. геодезической привязки каждой точки изображения поверхности Земли.

Традиционный подход к решению этой задачи основан на измерении параметров орбиты и углов ориентации спутника и использовании этих данных для коррекции изображений. Неточность определения углов тангажа и крена спутника вызывает после нормализации изображения смещение диска Земли соответственно в направлении полюсов и вдоль экватора; погрешность оценки угла рысканья приводит к повороту изображения, а ошибка в измерении высоты – к изменению масштаба. Например, при погрешности измерений углов тангажа и крена в 2 угл. мин центральная точка снимка смещается на 20 км в системе координат земной поверхности, что составляет десятки пикселей изображения. То есть наличие погрешностей в навигационных измерениях не позволяет с требуемой точностью выполнить геодезическую привязку изображений земной поверхности.

В работе [1] рассматривается решение поставленной задачи на основе определения контурных точек диска Земли, который с высоким контрастом отображается на фоне окружающего космоса. По контурным точкам оцениваются параметры смещения и изменения формы диска. Однако, поскольку контур диска Земли описывается эллипсом, близким к окружности, достаточно точно оценить ориентацию осей эллипса не представляется возможным. Кроме этого, при определенных положениях Солнца часть диска Земли находится в области тени и контурные точки отсутствуют.

В последние годы приняты попытки создания технологий геодезической привязки космических изображений от низкоорбитальных космических аппаратов, вращающихся вокруг Земли, с использованием электронных карт (ЭК) [2-5]. В данном случае для расчетного положения спутника и прогнозируемого района земной поверхности из электронного каталога извлекается соответствующий участок ЭК, и на основе поиска одноименных точек снимка и карты решается задача геодезической привязки изображений. Однако центральная задача данной технологии – поиск одноименных точек – решается с участием человека.

Отличие от низкоорбитальных спутников, для геостационарных космических систем задача привязки изображений по ЭК значительно упрощается, поскольку в данном случае выполняется съемка одной и той же территории земного диска, что создает предпосылки для полной автоматизации процесса геодезической привязки. В качестве опорной координатной основы целесообразно использовать объекты береговых линий морей, океанов и крупных озер, которые хорошо различимы на изображениях от геостацио-

нарных спутников, характеризуются высокой временной устойчивостью и в большинстве ЭК выделены в отдельный слой.

Технология геодезической привязки по ЭК. В настоящей работе рассматривается технология надежной геодезической привязки, основанная на четырех конструктивных предложениях. Во-первых, на снимке и карте выделяются уникальные объекты, которые имеют характерную геометрическую форму и устойчивы во времени (изломы береговых линий, контуры крупных островов и т.п.). Во-вторых, на основе этих объектов формируются бинарные маски в виде фрагмента уникальной линии карты, расширенной с одной стороны областью с единичными элементами яркости (что соответствует суше), а с другой стороны - областью с нулевыми элементами (что соответствует водной поверхности). В-третьих, выполняется корреляционный поиск одноименных объектов на снимке, которые наиболее близки к маске по геометрии и яркостному перепаду. В-четвертых, на основе множества найденных опорных точек местности (ОТМ) устанавливается геометрическое соответствие снимка и карты. Рассмотрим конкретное содержание этих этапов.

1 этап. На ЭК выделяются характерные участки $G_{A_i}(x, y)$, $i = \overline{1, I}$ (рисунок 1, а), центры которых (x_{i_0}, y_{i_0}) , $i = \overline{1, I}$, определяют положение ОТМ. Для каждой ОТМ (x_{i_0}, y_{i_0}) на изображении формируется зона поиска $B_i(x, y)$ с очертанием характерного участка береговой линии $G_{B_i}(x, y)$ (рисунок 1, в). На рисунке 1 индекс i для простоты опущен. Анализ данных от геостационарного спутника METEOSAT-5 и электронной карты GSHHS показал, что на них можно выделить несколько десятков фрагментов, которые имеют уникальную форму береговых линий и расположены по всей площади земного диска.

2 этап. Для каждого уникального участка ЭК формируется бинарная маска $A_i(x, y)$, $i = \overline{1, I}$, в виде «коридора» с равноудаленными границами от линии карты (рисунок 1, б). Осевая линия «коридора» является линией ЭК; элементам, находящимся по одну сторону линии, включая и ее, присваивается единичная яркость, по другую сторону – нулевая, что соответствует более светлой суше и более темной водной поверхности. Таким образом, «коридор» учитывает как топологию береговых линий, так и взаимное расположение водной и земной поверхностей. Для каждого фрагмента изображения формируется набор бинарных масок с разной шириной «кори-

дора» для увеличения надежности совмещения фрагмента снимка и маски.

Таким образом, имеем для каждой бинарной маски $A_i(x, y)$, $i = \overline{1, I}$, одноименные участки земной поверхности, содержащиеся в зонах поиска $B_i(x, y)$, $i = \overline{1, I}$.

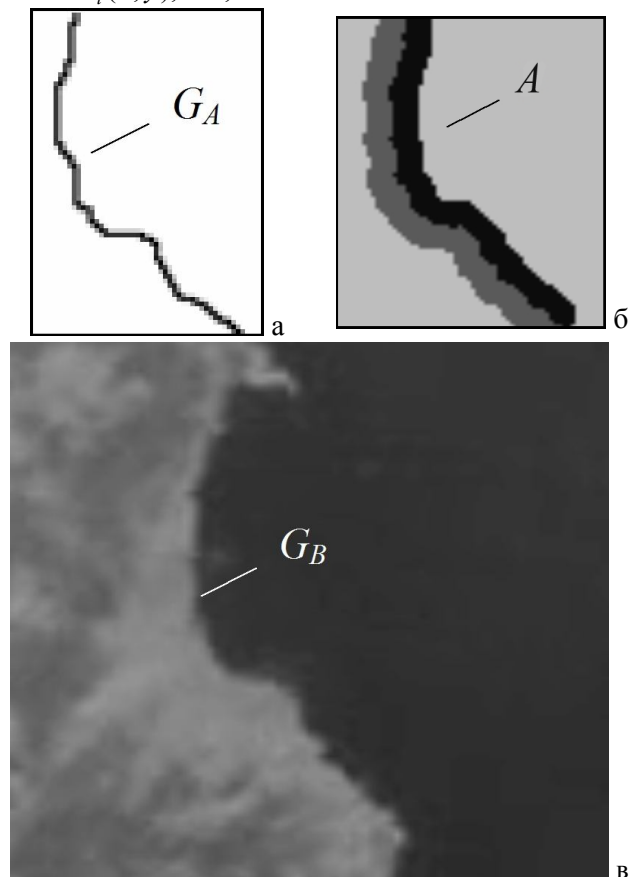


Рисунок 1 – Уникальный фрагмент карты (а), бинарная маска (б) и зона поиска уникального фрагмента снимка (в)

3 этап. Выполняется совмещение $A_i(x, y)$ и $B_i(x, y)$, $i = \overline{1, I}$, с использованием коэффициента корреляции

$$\rho = \frac{\overline{BA} - \overline{B}\overline{A}}{\sqrt{D_B D_A}}, \quad (1)$$

где \overline{BA} - среднее значение произведений одноименных элементов изображения и маски; \overline{A} , \overline{B} и D_A , D_B - соответственно средние яркости и оценки дисперсий, найденные по элементам маски и изображения. С учетом бинарного представления $A_i(x, y)$, $i = \overline{1, I}$, вычисление коэффициента корреляции упрощается:

$$\rho = \frac{\overline{B_1 - B_0}}{\sqrt{D_B}} \cdot \frac{\sqrt{q_1 q_0}}{q_1 + q_0}, \quad (2)$$

где \overline{B}_1 , \overline{B}_0 и q_1 , q_0 - соответственно средние яркости и число точек под единичной и нулевой областями маски. При $q_1 = q_0$

$$\rho = \frac{\overline{B}_1 - \overline{B}_0}{2\sqrt{D_B}}. \quad (3)$$

Для повышения надежности рассматриваемой задачи используются несколько критериев отбраковки опорных точек местности.

1. Критерий, основанный на статистических характеристиках водной и земной поверхности. Опорная точка отбраковывается, если:

$$\overline{B}_0 > \overline{B}_1 \text{ или } D_0 > D_1. \quad (4)$$

2. Критерий, основанный на анализе коэффициента корреляции. Опорная точка отбраковывается, если:

$$\rho_{\max} < \rho_0, \rho_{\max} / \rho_{\max}^* < p, \sigma_\rho < \sigma_\rho^*, \quad (5)$$

где ρ_{\max} , ρ_{\max}^* , ρ_0 - соответственно максимальное, следующее по величине в заданной области и пороговое значения коэффициента корреляции; p - некоторый порог; σ_ρ , σ_ρ^* - соответственно СКО коэффициента корреляции и пороговое значение.

3. Критерий, основанный на подсчете процента облачности под нулевой маской. Точка отбраковывается, если:

$$q_{\text{обл},0} / q_0 > K_{\text{обл}}, \quad (6)$$

где $q_{\text{обл},0}$ - число точек облачных образований под нулевой областью маски, $K_{\text{обл}}$ - пороговое значение процента облачности.

После отбраковки формируются множества одноименных точек (x_i, y_i) и (x_i^*, y_i^*) , принадлежащих соответственно карте и снимку.

4 этап. По методу наименьших квадратов (МНК) определяются полиномы P_x , P_y , устанавливающие геометрическое соответствие одноименных точек снимка и карты. Коэффициенты этих полиномов находятся из условий:

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

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

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

Модель совмещения при совпадении G_A и G_B . Будем считать, что осевой линии маски G_A , т. е. фрагменту ЭК, в точности соответствует по геометрии одноименный фрагмент береговой линии G_B на снимке. В этом случае

$$\overline{BA} = 0,5\overline{B}_1, \overline{B} = 0,5(\overline{B}_0 + \overline{B}_1), \overline{A} = 0,5, \\ D_A = 0,25, D_B = 0,5(D_0 + D_1) + 0,25(\overline{B}_1 - \overline{B}_0)^2.$$

В результате на основе (1) получим

$$\rho = \frac{1}{\sqrt{1 + 2\frac{D_0 + D_1}{(\overline{B}_1 - \overline{B}_0)^2}}}. \quad (7)$$

Из (7) следует, что значение коэффициента корреляции в точке наилучшего совпадения осевой линии бинарной маски и соответствующего участка береговой линии на снимке в значительной степени зависит от дисперсий и средних значений яркостей изображений водной поверхности и суши. Любые линейные преобразования яркости изображения $B^* = kB + c$ (k и c - коэффициенты преобразования) не изменяют значение параметра $\eta_{01} = (D_0 + D_1) / (\overline{B}_1 - \overline{B}_0)^2$ в (7), поскольку $D_0^* = k^2 D_0$, $D_1^* = k^2 D_1$, $\overline{B}_0^* = k\overline{B}_0 + c$, $\overline{B}_1^* = k\overline{B}_1 + c$ и $\eta_{01}^* = \eta_{01}$. При совмещении маски с бинарным изображением, для которого $D_0 = D_1 = 0$, коэффициент корреляции достигает максимального значения $\rho = 1$. Поэтому одним из подходов повышения надежности совмещения электронной карты с изображением земной поверхности является кластеризация последнего, т.е. разделение на участки суши и водной поверхности. При этом центральный вопрос состоит в выборе таких параметров кластеризации, при которых обеспечивается наилучшее геометрическое совмещение G_A и G_B .

Модель совмещения при геометрическом различии G_A и G_B . На практике фрагменты электронной карты G_A и соответствующие им очертания береговых линий на снимках G_B абсолютно точно не совпадают. Это приводит к некоторой неопределенности оценки координат точки наилучшего совмещения G_A с G_B . Пусть α - доля элементов суши под нулевой областью маски, а β - доля элементов водной поверхности под единичной областью («чужие» элементы). В этом случае изображения под нулевой и единичной областями маски можно представить как

$$B_0^* = \alpha B_1 + (1 - \alpha) B_0, B_1^* = \beta B_0 + (1 - \beta) B_1. \quad (8)$$

На основе (8) получим

$$\overline{BA} = 0,5[\beta\overline{B}_0 + (1 - \beta)\overline{B}_1], \overline{A} = 0,5,$$

$$\overline{B} = 0,5(\overline{B}_0^* + \overline{B}_1^*) = 0,5[(1 - \alpha + \beta)\overline{B}_0 + (1 + \alpha - \beta)\overline{B}_1],$$

$$D_B = 0,5 \left[(\overline{B_0^*})^2 + (\overline{B_1^*})^2 \right] - (\overline{B})^2 = 0,5[1 - (\alpha - \beta)]D_0 + 0,5 [1 + (\alpha - \beta)]D_1 + 0,25 [1 - (\alpha - \beta)^2] \Delta^2;$$

$$\rho = \frac{1 - (\alpha + \beta)}{\sqrt{1 + 2\eta_{01} + 2(\alpha - \beta)\eta_{10} - (\alpha - \beta)^2}}, \quad (9)$$

где $\Delta = \overline{B_1} - \overline{B_0}$, $\eta_{01} = \frac{D_0 + D_1}{\Delta^2}$, $\eta_{10} = \frac{D_1 - D_0}{\Delta^2}$.

При $\alpha = \beta = 0$, как и должно быть, выражение (9) вырождается в (7). Из (9) следует, что 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 $(\alpha - \beta)$. По ходу получения формулы (9) можно сделать следующее замечание. Член \overline{BA} , который должен определять меру сходства фрагмента снимка и маски, зависит только от β и при $\overline{B_1} > \overline{B_0}$ и $\beta = 0$ достигает максимального значения $0,5\overline{B_1}$, когда элементы водной поверхности полностью отсутствуют под единичной областью маски. В результате центрирования и нормирования \overline{BA} 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.

Зафиксируем сумму $\alpha + \beta = s = \text{const}$ и определим значения разности $\alpha - \beta = \varepsilon$, при которых ρ принимает минимальное и максимальное значения. Обозначим в (9) выражение под радикалом через Z и последовательно получим

$$\frac{\partial Z}{\partial \varepsilon} = 2\eta_{10} - 2\varepsilon, \quad \frac{\partial^2 Z}{\partial \varepsilon^2} = -2 < 0.$$

Следовательно, при $\varepsilon = \eta_{10}$ $Z = \text{max}$ и

$$\rho_{\min} = \frac{1 - s}{\sqrt{1 + 2\eta_{01} + \eta_{10}^2}} \quad (10)$$

Нетрудно установить, что максимальное значение ρ_{\max} достигается при $\varepsilon = -s$, когда $\alpha = 0$, а $\beta = s$:

$$\rho_{\max} = \frac{1 - s}{\sqrt{1 + 2\eta_{01} - (2s\eta_{10} + s^2)}}. \quad (11)$$

С ростом $s = \alpha + \beta$ уменьшается ρ_{\max} . Это следует из тождественного выражения

$$\rho_{\max} = \frac{1}{\sqrt{1 + s + 2\eta_{10} \frac{1}{1 - s} + 4\eta_0 \frac{1}{(1 - s)^2}}}, \quad (12)$$

где $\eta_0 = D_0/\Delta^2$. При $s = 0$ ($\alpha = \beta = 0$) ρ_{\max} достигает абсолютного максимума

$\rho_{\max}^* = (1 + 2\eta_{10})^{-\frac{1}{2}}$, что совпадает с (7). Следовательно, при $\alpha + \beta = s = \text{const}$ мера сходства $\overline{BA} = \text{max}$ при $\beta = 0$, $\alpha = s$, а коэффициент корреляции $\rho = \text{max}$ при $\alpha = 0$, $\beta = s$, т.е. ρ дает смещенную оценку точки наилучшего сходства по отношению к \overline{BA} .

При $\alpha = \beta = 0,5s$ из (9) следует, что $\rho_0 = (1 - s)(1 + 2\eta_{10})^{-\frac{1}{2}}$, т.е. $\rho_{\min} < \rho_0 < \rho_{\max}$. Несовпадение ρ_0 с ρ_{\max} свидетельствует также о наличии методической ошибки, которая определяется суммой $2s\eta_{10} + s^2$ в (11) и приводит к смещенной оценке точки совпадения G_A и G_B . Только при полном совпадении G_A с G_B , т.е. при $\alpha = \beta = s = 0$, методическая ошибка отсутствует.

Характер измерения α и β . Покажем, что α и β являются зависимыми параметрами в зоне поиска наилучшего совмещения бинарной маски и изображения. Рассмотрим точку отсчета $x=0$, в которой все элементы нулевой полумаски накрывают фрагмент водной поверхности, а под единичную полумаску попадают точки суши и водной поверхности. При этом уже в следующей позиции $x = 1$ под нулевой полумаской появляются точки суши. Будем перемещать маску в позиции $x = 1, 2, 3, \dots, m$, подсчитывая долю элементов суши под нулевой полумаской α_x и долю элементов водной поверхности под единичной полумаской β_x , до тех пор, пока в конечной позиции $x = m$ под единичной полумаской будут находиться только элементы суши (рисунок 2).

Пусть $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots$, – доля элементов суши под осевой линией маски в позициях $x = 1, 2, 3, \dots$, т.е. количество элементов суши s_x , отнесенное к числу элементов полумаски q .

Тогда

$$\alpha_x = \sum_{i=1}^x \alpha_i, \quad \beta_x = \beta_0 - \sum_{i=1}^x \left(\frac{l - s_i}{q} \right), \quad (13)$$

$$0 \leq \alpha_x \leq \alpha_m, \quad \beta_0 \geq \beta_x \geq 0,$$

где $\alpha_i = s_i/q$, l – число элементов в осевой линии.

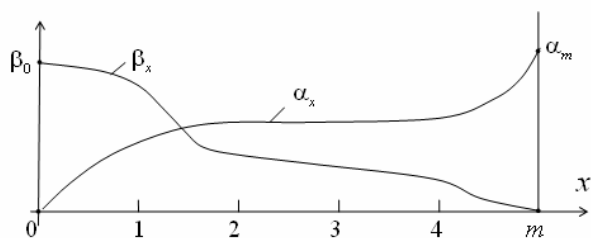


Рисунок 2 – Характер изменения доли «чужих» элементов под нулевой и единичной областями

Из (13) следует, что

$$\beta_x = \alpha_x + \beta_0 - \frac{l}{q} x; \quad (14)$$

$$\alpha_x + \beta_x = 2\alpha_x + \beta_0 - \frac{l}{q} x,$$

$$\alpha_x - \beta_x = \frac{l}{q} x - \beta_0. \quad (15)$$

В результате (9) приводится к виду

$$\rho_x = \frac{1 + x_0 - 2\alpha_x}{\sqrt{1 + 2\eta_{01} + 2x_0\eta_{10} - x_0^2}}, \quad (16)$$

где $x_0 = \frac{l}{q} x - \beta_0$, $-\beta_0 \leq x_0 \leq \alpha_m$, $0 \leq \alpha_x \leq \alpha_m$,

$$\frac{l}{q} = \frac{\beta_0 + \alpha_m}{m}.$$

Рассмотрим частный случай, когда в зоне поиска $0 \leq x \leq m$ в равных долях присутствуют элементы суши и водной поверхности, т.е. $\beta_0 = \alpha_m$, и α_x изменяется линейно по мере роста x . В этом случае

$$\alpha_x = \frac{\beta_0}{m} x, \quad x_0 = \frac{2\beta_0}{m} x - \beta_0.$$

Числитель (16) при таких α_x и x_0 становится равным $(1 - \beta_0)$, и ρ_x принимает максимальное значение при $x = 0$, а не в середине зоны неопределенности при $x = 0,5m$. Методическая ошибка в данном примере составляет $0,5m$.

Несимметричная бинарная маска. Пусть Ω , Ω_0 , Ω_1 - соответственно площадь (число элементов) всей маски, площади нулевой и единичной областей ($\Omega = \Omega_0 + \Omega_1$); $\gamma = \Omega_0/\Omega$ - доля нулевой области, $1 - \gamma = \Omega_1/\Omega$ - доля единичной области. В этом случае:

$$\overline{BA} = (1 - \gamma) [\beta \overline{B_0} + (1 - \beta) \overline{B_1}]; \quad A = (1 - \gamma);$$

$$\overline{B} = \gamma [\alpha \overline{B_1} + (1 - \alpha) \overline{B_0}] + (1 - \gamma) [\beta \overline{B_0} + (1 - \beta) \overline{B_1}];$$

$$D_A = (1 - \gamma) - (\overline{A})^2 = \gamma(1 - \gamma);$$

$$D_B = \gamma [\alpha \overline{B_1}^2 + (1 - \alpha) \overline{B_0}^2] - (1 - \gamma) [\beta \overline{B_0}^2 + (1 - \beta) \overline{B_1}^2] - (\overline{B})^2 = \pi D_0 + (1 - \pi) D_1 + \pi(1 - \pi) \Delta^2,$$

где $\pi = \beta + \gamma(1 - \alpha - \beta)$.

С учетом этих соотношений получим выражение для коэффициента корреляции:

$$\rho = \frac{\sqrt{\gamma(1 - \gamma)} (1 - \alpha - \beta)}{\sqrt{\pi(1 - \pi) + \pi\eta_0 + (1 - \pi)\eta_1}}, \quad (17)$$

где $\eta_0 = D_0/\Delta^2$, $\eta_1 = D_1/\Delta^2$.

При $\gamma = 0,5$, как и должно быть, из (17) следует формула (9).

Рассмотрим случай полного совпадения осевой линии маски с соответствующим участком береговой линии, т.е. когда $\alpha = \beta = 0$ и $\pi = \gamma$:

$$\rho = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{\eta_0}{(1 - \gamma)^2} + \frac{\eta_1}{\gamma^2}}}. \quad (18)$$

Найдем значение γ , при котором подрадикальное выражение Z принимает минимальное, а ρ - максимальное значения:

$$\frac{\partial Z}{\partial \gamma} = \frac{\eta_0}{(1 - \gamma)^2} - \frac{\eta_1}{\gamma^2} = 0,$$

$$\frac{\partial^2 Z}{\partial \gamma^2} = \frac{2\eta_0}{(1 - \gamma)^3} + \frac{2\eta_1}{\gamma^3} > 0, \text{ откуда}$$

$$\gamma = \frac{\sigma_1}{\sigma_0 + \sigma_1}, \quad (19)$$

где $\sigma_0 = \sqrt{D_0}$, $\sigma_1 = \sqrt{D_1}$. Поэтому

$$\rho_{\max} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma_0 + \sigma_1}{\Delta}\right)^2}}. \quad (20)$$

При симметричной маске ($\gamma = 0,5$) пиковое значение ρ в общем случае уменьшается, $\rho = 1/\sqrt{1 + 2(\eta_0 + \eta_1)}$. Равенство $\rho = \rho_{\max}$ достигается только при $D_0 = D_1 = D$: $\rho = \rho_{\max} = 1/\sqrt{1 + 2\eta}$, где $\eta = D/\Delta^2$. Следовательно, для повышения качества процесса совмещения бинарной маски с изображением необходимо учитывать статистические свойства водной поверхности и суши путем конструирования несимметричной маски с параметром γ , определяемым по формуле (19).

Вернемся к формуле (17) и рассмотрим более общий случай наличия области неопределенности, задаваемой параметрами $\alpha \neq 0$, $\beta \neq 0$. Условие $\partial \rho / \partial \gamma = 0$ дает квадратные уравнения

для нахождения значения γ , при котором $\rho = \max$:

$$(1 - \alpha - \beta)(\alpha - \beta - \eta_{10})\gamma^2 - 2(\beta^2 - \beta + \beta\eta_{10} - \eta_1)\gamma + (\beta^2 - \beta + \beta\eta_{10} - \eta_1) = 0. \quad (21)$$

С учетом того, что $\alpha \ll 1$, $\beta \ll 1$, последнее выражение упрощается:

$$(\eta_{10} - \alpha + \beta)\gamma^2 - 2(\beta + \eta_1)\gamma + (\beta + \eta_1) = 0. \quad (22)$$

И (21), и (22) при $\gamma = 0,5$ дают ожидаемый результат: $\gamma = \sigma_1 / (\sigma_1 + \sigma_0)$. Из (21) следует

$$\gamma = \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{\eta_0 + \alpha}{\eta_1 + \beta}}} = \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{D_0 + \alpha\Delta^2}{D_1 + \beta\Delta^2}}}, \quad (23)$$

при котором $\rho = \max$.

В отличие от (19), в формуле (23) наилучшее значение γ , при котором $\rho = \max$, определяется не только σ_1 и σ_2 , но и разностью средних яркостей Δ , а также соотношением между α и β . Анализ (17) и (23) для практических значений η_0 , η_1 , α и β показывает, что при $\alpha + \beta = s = \text{const}$ коэффициент корреляции достигает максимума при $\alpha = 0$, $\beta = s$.

Экспериментальные исследования. Выполнены исследования точности и быстродействия алгоритмов геодезической привязки по ЭК с использованием моделирующей программы.

Для оценки точности геодезической привязки изображения по ЭК формировалось эталонное изображение, объекты которого максимально совпадали с одноименными объектами карты.

Для эталонного изображения было сформировано 53 уникальных фрагмента в виде бинарных масок, которые определяли опорные точки (x_{i_3}, y_{i_3}) , $i = \overline{1, I}$ ($I = 53$).

Затем задавались отдельные и совместные изменения углов тангажа α , крена ω , рыскания χ и высоты H полета спутника относительно номинальных значений и по аналитическим моделям, описывающим действие этих факторов, формировались искаженные изображения. Выполнялся также пересчет (x_{i_3}, y_{i_3}) , $i = \overline{1, I}$, в плоскость искаженного изображения. В результате формировалось множество точек искаженного изображения (x_{i_u}, y_{i_u}) , $i = \overline{1, I}$.

По рассмотренной выше технологии на искаженном изображении автоматически определялись координаты ОТМ $(x_{i_u}^*, y_{i_u}^*)$, $i = \overline{1, I}$. На основе $(x_{i_u}^*, y_{i_u}^*)$ и (x_{i_3}, y_{i_3}) , $i = \overline{1, I}$, по МНК находи-

лись полиномы $x_3 = P_x(x_u^*, y_u^*)$, $y_3 = P_y(x_u^*, y_u^*)$, определяющие геометрическое соответствие одноименных точек на эталонном и искаженном изображениях. По этим полиномам точки $(x_{i_u}^*, y_{i_u}^*)$, $i = \overline{1, I}$, переносились в плоскость эталонного изображения, в результате формировалось множество точек (x_{i_3}, y_{i_3}) , $i = \overline{1, I}$.

Погрешность корреляционного совмещения эталонного и скорректированного изображений оценивалась как

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{I} \sum_i (x_{i_u} - x_{i_u}^*)^2}, \quad \sigma_y = \sqrt{\frac{1}{I} \sum_i (y_{i_u} - y_{i_u}^*)^2}. \quad (24)$$

Погрешность геодезической привязки оценивалась по аналогичным формулам:

$$\sigma_x^* = \sqrt{\frac{1}{I} \sum_{i=1}^I (x_{i_3} - x_{i_3}^*)^2}, \quad \sigma_y^* = \sqrt{\frac{1}{I} \sum_{i=1}^I (y_{i_3} - y_{i_3}^*)^2}. \quad (25)$$

Точность геодезической привязки центральной точки диска Земли (x_{0_3}, y_{0_3}) оценивалась как

$$\Delta_{x0} = x_{0_3} - x_{0_3}^*, \quad \Delta_{y0} = y_{0_3} - y_{0_3}^*, \quad (26)$$

где $(x_{0_3}^*, y_{0_3}^*)$ – центральная точка искаженного изображения, перенесенная в плоскость эталонного по полиномам P_x, P_y .

На рисунке 3 в качестве примера слева на фоне карты приведен фрагмент искаженного изображения (включающий ОТМ №50), а справа – тот же фрагмент после выполнения процедуры корреляционного совмещения с ЭК.

По результатам экспериментов можно сделать следующие выводы:

- точность геодезической привязки по ЭК практически не зависит от действия одного либо группы искажающих факторов;

- СКО (σ_x, σ_y) оценки координат ОТМ с помощью корреляционного поиска составляет порядка 0.5 – 0.7 пикселя;

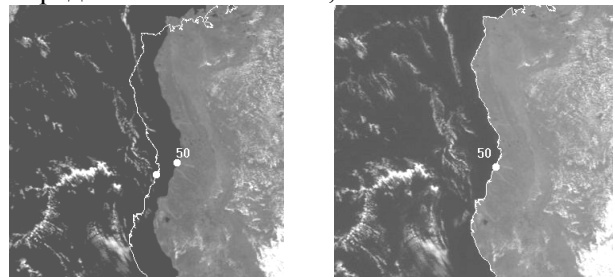


Рисунок 3 – Фрагменты искаженного (слева) и скорректированного (справа) изображений

- СКО (σ_x^* , σ_y^*) геодезической привязки составляет порядка 0.2 - 0.5 пикселя;

- погрешность геодезической привязки центральной точки диска Земли (Δ_{x0} , Δ_{y0}) не превышает 0.7 пикселя;

- при более чем 50%-м затенении диска Земли погрешность оценки его смещения возрастает и уже при 70% -м затенении становится недопустимо большой;

- оценка параметров поворота диска Земли и его масштабных искажений с допустимой точностью выполняется при затенении диска до 50%; при большем затенении эти параметры оцениваются с недопустимой погрешностью.

Эксперименты выполнялись на серверной ЭВМ IBM x3850 с 4-мя двухядерными процессорами Intel Xeon 7120N 4x3.0GHz / 667 MHz, которая при эффективном распараллеливании вычислительного процесса обеспечивает 25 млрд операций в секунду и имеет оперативную

память 8 Гбайт. Время геодезической привязки изображения по 53 опорным фрагментам составило 15 секунд.

Библиографический список

1. Еремеев В.В., Егюшкин Н.А., Москвитин А.Э. Координатная привязка изображений от геостационарных спутников по контурным точкам диска Земли // Вестник РГРТУ. Вып. 22. 2007. - С. 10 – 17.

2. Злобин В.К., Еремеев В.В. Обработка аэрокосмических изображений. М.: Физматлит, 2006. - 288 с.

3. 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.

4. Rosborough G.W., Baldwin D.G., Emery W.J. Precise AVHRR image navigation // IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens. 1994. 32. №3. - P.644-657.

5. Mather P.M. Map-image registration accuracy using least-squares polynomials // Int.J. Geogr. Inform. Syst. 1995. 9. №5. - P.543-554.