

Геодезическая привязка изображений от геостационарных спутников по контуру диска Земли и электронным картам

Н.А. Егошкин¹, В.В. Еремеев¹, Е.П. Козлов¹, И.В. Москатиньев², А.Э. Москвитин¹

¹ *Рязанский государственный радиотехнический университет*

390005 г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1

E-mail: gislab@org.etr.ru

² *ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина»*

141400, Московская обл., г. Химки, ул. Ленинградская, 24

E-mail: khsm@laspace.ru

Представлена технология геодезической привязки изображений от геостационарных спутников на основе совместного использования двух подходов. Первый подход основан на анализе контурных точек диска Земли, контрастно отображающегося на фоне космоса. Второй подход базируется на автоматическом совмещении уникальных фрагментов береговых линий, отображающихся на снимках, с одноименными объектами электронных карт. Выполнен точностной анализ этой технологии, даны рекомендации по ее практическому использованию.

Ключевые слова: обработка изображений, геодезическая привязка, геостационарные спутники, электронные карты.

Введение

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 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 вызывают 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.

В настоящей работе рассматривается задача уточнения геодезической привязки изображений от геостационарных спутников путем совместного использования информации о контурных точках диска Земли и электронных карт.

Геодезическая привязка по контурным точкам диска Земли [1-2] основана на том, что изображения от геостационарных спутников содержат земной диск, который контрастно отображается на фоне космоса, и при отсутствии искажающих факторов должен располагаться в строго определенной позиции, иметь форму эллипса с известными размерами и ориентацией полуосей. Пу-

тем сравнения реально наблюдаемого диска Земли с эталонным эллипсом решается задача уточнения его положения и размеров.

Привязка по электронным картам (ЭК) [2-5] основана на том, что для выбранных фрагментов береговых линий снимка создаются одноименные фрагменты электронных карт, которые выступают в качестве опорной координатной основы. Путем отождествления одноименных фрагментов снимка и карты решается задача уточнения геодезической привязки объектов наблюдаемой сцены.

Для повышения точности, надежности и скорости решения поставленной задачи представляется целесообразным последовательное использование этих технологий: на первом этапе на основе контурных точек диска Земли уточняется положение его центра и размеров; на втором – с использованием ЭК выполняется окончательная геодезическая привязка объектов сцены.

Технология привязки по контурным точкам диска Земли

Технология включает следующие основные этапы. *Во-первых*, на исходном искаженном изображении выделяются контурные точки диска Земли. Их расположение по форме может значительно отличаться от эллипса. *Во-вторых*, выделенные краевые точки преобразуются во вспомогательную плоскость, которая перпендикулярна к линии, соединяющей центр Земли и центр масс спутника. С использованием программной модели видеодатчика устраняются вносимые им искажения. Во вспомогательной плоскости контурные точки образуют в идеальном случае эллипс, а в реальных условиях фигуру, близкую к нему. В этой плоскости с использованием номинальных параметров съемки математически определяется эталонный эллипс. *В-третьих*, с использованием выделенных краевых точек диска Земли решается задача оценки параметров реального эллипса: координат его центра, размеров полуосей и угла их наклона. На основе сопоставления этих параметров с одноименными параметрами эталонного эллипса формируются поправки к координатам и углам ориентации. Рассмотрим конкретное содержание этих этапов.

1 этап. Выполняется разделение изображения на космос и диск Земли, после чего находятся граничные точки диска. Разбиение изображения на точки, принадлежащие диску Земли и космосу, основано на том, что яркость космоса заведомо меньше яркости точек земной поверхности. Поэтому можно определить порог яркости b_{Π} такой, что если $B(m, n) > b_{\Pi}$, то точка (m, n) считается принадлежащей диску Земли, а если $B(m, n) \leq b_{\Pi}$, то космосу. Порог b_{Π} определяется по гистограмме как точка между двумя областями, соответствующими космосу и диску Земли. После чего формируется бинарное изображение $B_{\sigma}(m, n)$: $B_{\sigma}(m, n) = 1$ при $B(m, n) > b_{\Pi}$, $B_{\sigma}(m, n) = 0$ при $B(m, n) \leq b_{\Pi}$. На $B_{\sigma}(m, n)$ ищутся связные области. *Во-первых*, определяется область O_{κ} нулевых точек, смежная с краями изображения. Эта область при съемке соответствует космосу. *Во-вторых*, ищется максимальная по площади связная область $O_{\text{д}}$ единичных точек. Она соответствует диску Земли. Остальные области, соответствующие импульсным помехам, звездам и ошибкам бинаризации, исключаются из дальнейшего анализа.

Нахождение координат контурных точек на изображении $B(m, n)$ выполняется с субпиксельной точностью на основе восстановления непрерывного изображения в районе границы области $O_{\text{д}}$ путем интерполяции. Контурные точки определяются как линии с уровнем яркости b_{Π} из уравнения

$$\mathfrak{R}(B(m, n)) = b_{\Pi}, \quad (1)$$

где \mathfrak{R} – оператор яркостной интерполяции, например, билинейной.

2 этап. Определяется плоскость, в которой краевые точки диска Земли образуют эллипс. В этой плоскости математически описывается эталонный эллипс, а контурные точки диска пересчитываются из регистрационной плоскости во вспомогательную.

Уравнение земного эллипсоида в гринвичской геоцентрической системе координат определяется как

$$(X^2 + Y^2)/a_3^2 + Z^2/b_3^2 = 1, \quad (2)$$

где (X, Y, Z) – координаты точки Земли; a_3, b_3 – экваториальный и полярный радиусы земного эллипсоида.

Пусть (X_0, Y_0, Z_0) – координаты спутника. Введем в рассмотрение вспомогательную плоскость с задающим вектором $\mathbf{S} = (X_0, Y_0, Z_0 a_3^2/b_3^2) / \sqrt{X_0^2 + Y_0^2 + Z_0^2 a_3^4/b_3^4}$, проходящую через центр Земли $(0,0,0)$:

$$X X_0 + Y Y_0 + Z Z_0 a_3^2/b_3^2 = 0. \quad (3)$$

Анализируя (2), (3), можно установить, что проекция (2) в плоскость (3) из точки (X_0, Y_0, Z_0) это эллипс с центром $(0,0,0)$ и полуосями

$$a = a_3 \sqrt{\frac{X_0^2 b_3^2 + Y_0^2 b_3^2 + Z_0^2 a_3^2}{X_0^2 b_3^2 + Y_0^2 b_3^2 + Z_0^2 a_3^2 - a_3^2 b_3^2}}, \quad b = \sqrt{\frac{X_0^2 b_3^4 + Y_0^2 b_3^4 + Z_0^2 a_3^4}{X_0^2 b_3^2 + Y_0^2 b_3^2 + Z_0^2 a_3^2 - a_3^2 b_3^2}}. \quad (4)$$

Из соображений симметрии можно показать, что большая полуось этого эллипса направлена по вектору $\mathbf{A} = (-Y_0, X_0, 0) / \sqrt{X_0^2 + Y_0^2}$, а малая полуось перпендикулярна к ней и направлена по вектору $\mathbf{B} = \mathbf{S} \times \mathbf{A}$.

Введем систему координат $X'Y'Z'$ так, чтобы ее оси были направлены вдоль векторов $\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{S}$ соответственно, а центр располагался в плоскости (3) в центре эллипса. В этой системе эллипс описывается уравнением

$$(X')^2/a^2 + (Y')^2/b^2 = 1. \quad (5)$$

Таким образом, в идеальном случае (при отсутствии искажений) краевые точки диска Земли в системе координат $X'Y'$ образуют эллипс (5) с известными параметрами (4). На основе анализа отклонения от эллипса (5) реальной геометрической фигуры контура диска оцениваются параметры геодезической привязки.

Далее выполним пересчет краевых точек во вспомогательную плоскость. Рассмотрим произвольную краевую точку с координатами (m, n) . С использованием математической модели сканирования видеодатчика находится направляющий вектор визирующего луча $\mathbf{r} = \mathbf{r}(m, n)$. С учетом установочных углов датчика и углов ориентации спутника выполняется переход в систему $X'Y'Z'$ путем умножения \mathbf{r} на матрицу ориентации КА \mathbf{M}_0 и матрицу \mathbf{M} перехода от XYZ к $X'Y'Z'$:

$$\begin{pmatrix} X'_0 \\ Y'_0 \\ Z'_0 \end{pmatrix} = \mathbf{M} \mathbf{M}_0 \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{r}' = \begin{pmatrix} r'_X \\ r'_Y \\ r'_Z \end{pmatrix} = \mathbf{M} \mathbf{M}_0 \mathbf{r}, \quad \mathbf{M} = \begin{bmatrix} A_X & A_Y & A_Z \\ B_X & B_Y & B_Z \\ S_X & S_Y & S_Z \end{bmatrix}. \quad (6)$$

После этого искомые плоскостные координаты (X_{Π}, Y_{Π}) образа краевой точки во вспомогательной плоскости определяются как

$$X_{\Pi} = X'_0 - Z'_0 r'_X / r'_Z, \quad Y_{\Pi} = Y'_0 - Z'_0 r'_Y / r'_Z. \quad (7)$$

3 этап. Определяются параметры фактического эллипса диска Земли и корректируются навигационные параметры. Опишем произвольный эллипс в виде уравнения:

$$X^2 + gXY + cY^2 + dX + eY + f = 0. \quad (8)$$

Коэффициенты в (8) определяются весовым методом наименьших квадратов (МНК) по крайним точкам, найденным на этапе 2, после чего искомые параметры эллипса выражаются через коэффициенты (8) как

$$X_{\text{ц}} = (eg - 2cd)/(4c - g^2), Y_{\text{ц}} = (dg - 2e)/(4c - g^2), \varphi = 0.5 \arctg g/(1 - c), \\ a_{\text{д}}, b_{\text{д}} = \sqrt{2(cd^2 + fg^2 + e^2 - edg - 4cf)/(4c - g^2) \left(1 + c \pm \sqrt{(1 - c)^2 + g^2}\right)}, \quad (9)$$

где $(X_{\text{ц}}, Y_{\text{ц}})$ – координаты центра; φ – угол поворота; $a_{\text{д}}, b_{\text{д}}$ – полуоси эллипса.

Далее выполняется коррекция исходных навигационных параметров: положения и углов ориентации спутника. Заметим, что проекция эталонного эллипса на вспомогательную плоскость (3) практически совпадает с его проекцией на плоскость $X X_0 + Y Y_0 + Z Z_0 = 0$, которая перпендикулярна лучу, соединяющему спутник с центром Земли. В этом случае поправки к углам ориентации спутника – тангажа, крена и рысканья определяются как

$$\Delta\alpha = \arctg X_{\text{ц}} / \sqrt{X_0^2 + Y_0^2 + Z_0^2}, \Delta\omega = \arctg Y_{\text{ц}} / \sqrt{X_0^2 + Y_0^2 + Z_0^2}, \Delta\chi = \varphi. \quad (10)$$

Отклонение найденных полуосей $a_{\text{д}}, b_{\text{д}}$ эллипса диска Земли от соответствующих полуосей a, b эталонного эллипса (5) свидетельствует об ошибках измерения расстояния спутника от центра Земли $\sqrt{X_0^2 + Y_0^2 + Z_0^2}$ и координаты Z_0 . Поскольку координаты X_0, Y_0 совместно входят в (4) в виде члена $X_0^2 + Y_0^2$, коррекция их по отдельности невозможна. Коррекция же координаты Z_0 возможна, но ее точность на практике неудовлетворительна. Поэтому уточнить можно только высоту спутника путем умножения его координат (X_0, Y_0, Z_0) на $0.5(a/a_{\text{д}} + b/b_{\text{д}})$.

Технология геодезической привязки по электронным картам

Эта технология основана 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, конуры 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 суши), 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 $G_{A_i}(x, y)$, $i = \overline{1, I}$, (рис. 1), центры которых (x_{i0}, y_{i0}) , $i = \overline{1, I}$, определяют положение ОТМ. Для каждой ОТМ (x_{i0}, y_{i0}) на изображении формируется зона поиска $B_i(x, y)$ с очертанием характерного участка береговой линии $G_{B_i}(x, y)$ (см. рис. 1). 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). Осевая линия «ко-

ридора» является линией ЭК; элементам, находящимся по одну сторону линии, включая и ее, присваивается единичная яркость, по другую сторону – нулевая, что соответствует более светлой суши и более темной водной поверхности. Таким образом, «коридор» учитывает как топологию береговых линий, так и взаимное расположение водной и земной поверхности. Для каждого фрагмента изображения формируется набор бинарных масок с разной шириной «коридора» 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 $B_i(x, y), i = \overline{1, I}$.

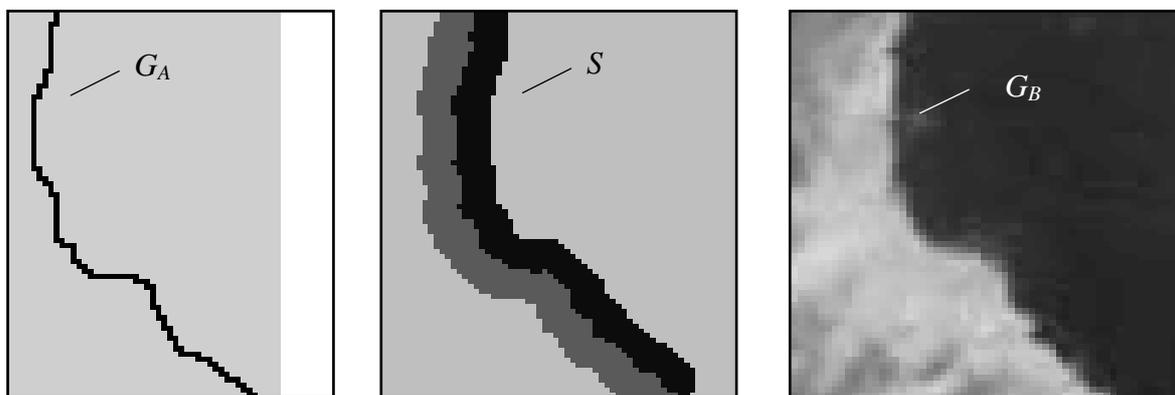


Рис. 1. Слева на право: уникальный фрагмент карты, бинарная маска и одноименный фрагмент снимка

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

$$\rho = (\overline{BA} - \overline{B}\overline{A}) / \sqrt{D_B D_A}, \quad (11)$$

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 существенно упрощается.

На рис. 2 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.

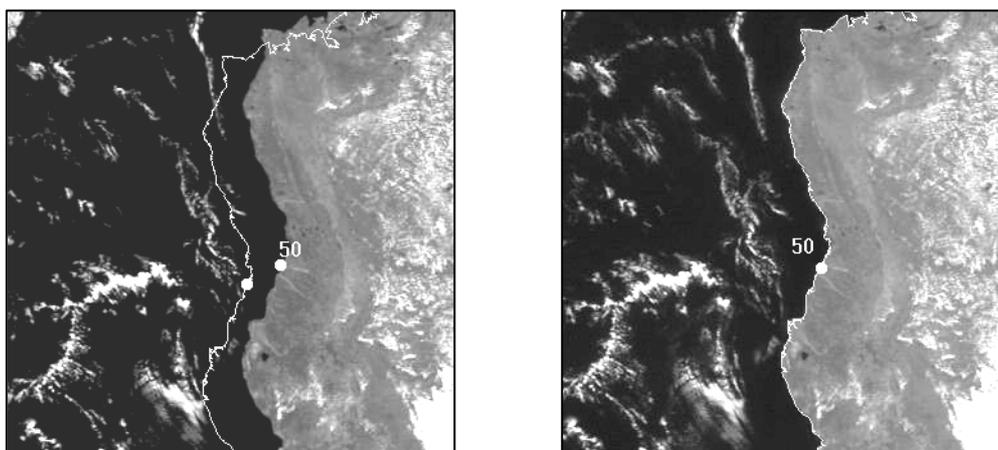


Рис. 2. Фрагменты искаженного (слева) и скорректированного (справа) изображений

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 $\overline{B_0} > \overline{B_1}$ или $D_0 > D_1$.

2. Критерий, основанный на анализе коэффициента корреляции. Опорная точка отбраковывается, если $\rho_{\max} < \rho_0$, $\rho_{\max} / \rho_{\max}^* < p$, $\sigma_\rho < \sigma_\rho^*$, 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 $q_{обл,0} / q_0 > K_{обл}$, где $q_{обл,0}$ - число точек облачных образований под нулевой областью маски, $K_{обл}$ - 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 МНК определяются полиномы P_x , P_y , устанавливающие геометрическое соответствие одноименных точек снимка и карты. Коэффициенты этих полиномов находятся из условий:

$$\sum_i [P_x(x_i^*, y_i^*) - x_i]^2 = \min, \sum_i [P_y(x_i^*, y_i^*) - y_i]^2 = \min, \quad (12)$$

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

Экспериментальные исследования

Рассмотренные алгоритмы и технология геодезической привязки спектральнональных изображений апробированы на модельных изображениях, полученных путем преобразования снимков со спутника «MeteoSat-5» и «MeteoSat-8» с имитацией характерных искажений: задавались отдельные и совместные изменения углов тангажа α , крена ω , рыскания χ и высоты H полета спутника относительно номинальных значений.

Установлено, что при геодезической привязке по диску Земли точность оценивания углов крена и тангажа составляет порядка 3 угл. сек., что соответствует смещению точек изображения порядка 0.5 пикселя. Точность оценивания угла рыскания χ невысока, порядка 200 угл. сек., в этом случае необходимо привлекать информацию от электронных карт. Точность коррекции высоты спутника составила порядка 1.5 км. Указанные точности оценки параметров геодезической привязки обеспечиваются даже при 80 % затенении диска Земли.

Для тестирования технологии привязки по ЭК было сформировано 53 уникальных фрагмента в виде бинарных масок. По результатам экспериментов можно сделать следующие выводы:

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

- среднеквадратическая ошибка (СКО) оценки координат опорных точек с помощью корреляционного поиска составляет порядка 0.5 – 0.7 пикселя;

- СКО геодезической привязки составляет порядка 0.2 - 0.5 пикселя;

- максимальная погрешность геодезической привязки центральной точки диска Земли 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%.

Эксперименты выполнялись на серверной ЭВМ IBM x3850 с четырьмя двудерными процессорами Intel Xeon 7120N 4x3.0GHz / 667 MHz, которая при принятии соответствующих мер по эффективному распараллеливанию вычислительного процесса обеспечила 25 млрд. операций в секунду при оперативной памяти 8 Гбайт. Время решения задачи геодезической привязки для типового потока данных от геостационарных спутников объемом 1.5 Гб по контурным точкам диска Земли составило 10 сек., по ЭК (53 опорных фрагмента) – 15 сек.

Рассмотренные алгоритмы и технологии положены в основу программного комплекса геодезической привязки видеоинформации с геостационарного спутника, проектируемого в настоящее время по проекту «Электро-Л».

Литература

1. Злобин В.К., Еремеев В.В., Кузнецов А.Е. Уточнение орбитального прогноза при координатной привязке спутниковых изображений // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2002. № 3. С. 78-91.

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. №5. P. 543-554.

Geodetic binding of images from the geostationary satellite on a contour of a disk of the Earth and electronic maps

N.A. Egoshkin¹, V.V. Eremeev¹, E.P. Kozlov¹, I.V. Moskatinyev², A.E. Moskvitin¹

¹ Ryazan state radio engineering university,
390005 Ryazan, Gagarin's street, 59/1
E-mail: gislab@org.etr.ru

² The federal State Unitary Enterprise «Scientifically a production association
of a name of S.A. Lavochkina»
141400, the Moscow region, of Khimki, street Leningrad, 24
E-mail: khsm@laspace.ru

The technology of a geodetic binding of images from geostationary companions on the basis of sharing of two approaches is presented. The first approach is based on the analysis of planimetric points of a disk of the Earth contrastly displayed against space. The second approach is based on automatic combination of unique fragments of the coastal lines displayed in pictures, with the objects of electronic maps with the same name. It is executed precision analysis of this technology, recommendations about its practical use are given.

Keywords: image processing, geodetic binding, geostationary companions, electronic maps.