

УДК 681.32(75)

В.В. Еремеев, Н.А. Егошкин, А.Э. Москвитин
КООРДИНАТНАЯ ПРИВЯЗКА ИЗОБРАЖЕНИЙ
ОТ ГЕОСТАЦИОНАРНЫХ СПУТНИКОВ
ПО КОНТУРНЫМ ТОЧКАМ ДИСКА ЗЕМЛИ

Рассмотрена технология автоматической оценки параметров смещения, поворота и масштабных искажений изображений диска Земли на основе выделения и анализа его контурных точек. Выполнен точностной анализ этой технологии, даны рекомендации по ее практическому использованию.

Введение. Геостационарные гидрометеорологические спутники выводятся на орбиты, расположенные в плоскости экватора на высоте порядка 35000 км. В этом случае космический аппарат вращается синхронно с Землей, т.е. неподвижно «зависает» на заданной долготе и обозревает весь земной шар и окружающий его космос. Обычно такие спутники каждые 30 минут формируют изображения Земной поверхности в нескольких диапазонах видимой и тепловой области спектра. Необходимо выполнить прием видеoinформации объемом порядка 1.5 Гб, преобразовать изображения в стандартную геостационарную проекцию и передать на спутник для последующего распространения на сеть наземных центров [1, 2].

Изображения от геостационарных спутников в исходном виде не могут быть использованы по назначению, поскольку содержат значительные геометрические искажения по отношению к наблюдаемой сцене. Большая часть искажений вызывается детерминированными факторами, кривизной Земли, нелинейностью развертки датчика и устраняется в процессе геометрической обработки. Другая часть искажений обусловлена действием случайных факторов, прежде всего, неточностью измерений параметров орбиты и углов ориентации спутников, конструктивных параметров датчика и др. В силу малости ошибок измерений искажения проявляются, главным образом, в виде смещения, поворота и изменения масштаба изображения диска земной поверхности. Это приводит к погрешностям геодезической привязки объектов земной поверхности.

Изображения от геостационарных спутников предоставляют уникальную возможность уточнения их геодезической привязки, поскольку содержат земной диск, контрастно отображающийся на фоне космоса. В идеальном случае, при отсутствии искажающих факторов, земной

диск должен отображаться на изображении в строго определенной позиции, иметь форму эллипса с известными размерами и ориентацией полуосей. Такое идеальное положение диска может быть строго математически описано и использовано в качестве эталона для сравнения с реально наблюдаемым диском Земли.

Цель работы заключается в том, чтобы путем сопоставления координат контурных точек эталонного и реально наблюдаемого дисков Земли оценить параметры геометрического несогласования и выполнить соответствующую коррекцию изображений.

Общая технология геодезической привязки включает следующие основные этапы.

Первый этап. На исходном искаженном изображении выделяются контурные точки диска Земли. Их расположение по форме может значительно отличаться от эллипса.

Второй этап. 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.

Третий этап. 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 спутника и набор одноименных точек местности, используемых для уточнения геопривязки.

Выделение контурных точек диска Земли.

При решении этой задачи выполняется разделение изображения на космос и диск Земли, после чего находятся граничные точки диска.

Видеодатчики, используемые в геостационарных космических системах, строятся по скановому принципу действия. Формируемые ими изображения состоят из набора перекрывающихся полос – сканов (рисунок 1).

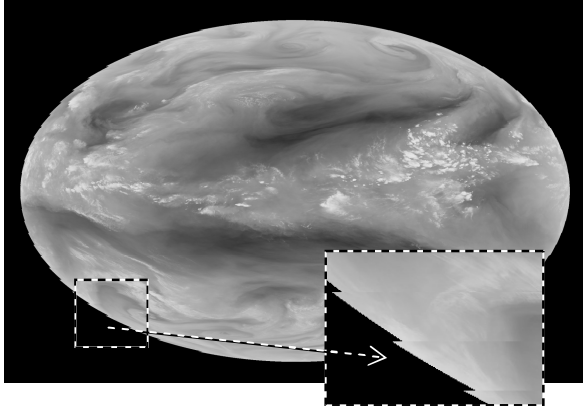


Рисунок 1 – Структура сканового изображения

Сегментация диска Земли-космоса. 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 $V(m, n) > b_{\Pi}$, то точка (m, n) считается принадлежащей диску Земли, а если $V(m, n) \leq b_{\Pi}$, то космосу.

Выбор порога b_{Π} основан на анализе гистограммы изображения $G(b)$. На ней присутствуют, по крайней мере, два пика; первый соответствует космосу, а остальные – объектам диска Земли (рисунок 2).



Рисунок 2 – Гистограмма изображения

Между пиками располагается область, соответствующая значениям яркости точек диска, граничащих с космосом. Размытость пиков гистограммы обусловлена шумами, остаточными

радиометрическими искажениями и характером наблюдаемой сцены.

Для нахождения b_{Π} вначале определяется теоретическая доля η_k точек космоса среди всех точек изображения $V(m, n)$, $m = \overline{1, M}$, $n = \overline{1, N}$. Для этого подсчитывается с использованием математической модели съемки количество s_k точек, которые соответствуют космосу, после чего $\eta_k = s_k / (MN)$. Вычисление теоретической доли η_k выполняется однократно. Затем оцениваются минимальная и максимальная доли точек диска Земли как $\eta_{\min} = \eta_k - \varepsilon$, $\eta_{\max} = \eta_k + \varepsilon$, где ε – поправка, учитывающая наличие граничных точек диска. Далее находятся соответствующие долям η_{\min} , η_{\max} яркости b_{\min} , b_{\max} из условий:

$$\frac{1}{MN} \sum_{b \leq b_{\min}} G(b) < \eta_{\min}, \quad b_{\min} = \max,$$

$$\frac{1}{MN} \sum_{b < b_{\max}} G(b) > \eta_{\max}, \quad b_{\max} = \min.$$

После этого порог определяется как $b_{\Pi} = 0.5(b_{\min} + b_{\max})$.

Для изображений, полученных в видимых диапазонах спектра, при выборе порога b_{Π} учитывается взаимное расположение Земли и Солнца, поскольку часть диска может быть не освещена и по яркости соответствовать окружающему космосу. Для этого корректируется η_k : $\eta'_k = 1 - (1 - \eta_k) k_c(\theta)$, где k_c – коэффициент освещенности видимой со спутника части диска Земли, зависящий от угла θ между векторами, направленными из центра Земли на спутник и Солнце. Положение Солнца определяется исходя из времени и даты съемки.

С использованием найденного порога b_{Π} формируется бинарное изображение $V_{\sigma}(m, n)$: $V_{\sigma}(m, n) = 1$ при $V(m, n) > b_{\Pi}$, $V_{\sigma}(m, n) = 0$ при $V(m, n) \leq b_{\Pi}$. Далее на бинарном изображении $V_{\sigma}(m, n)$ ищутся связанные области. Во-первых, определяется связанная область O_k нулевых точек, смежная с краями изображения. Эта область при съемке соответствует космосу. Во-вторых, ищется максимальная по площади связанная область O_d единичных точек. Она соответствует диску Земли. Остальные области соответствуют импульсным помехам, звездам и ошибкам бинаризации. Тем самым путем исключения из анализа точек изображения $V(m, n)$, отличных от O_k и O_d , достигается фильтрация упомянутых искажающих факторов. Частичное перекрытие

сканов изображения $B(m, n)$ практически не влияет на характер связности областей точек.

Определение координат краевых точек. Нахождение с субпиксельной точностью координат контурных точек на изображении $B(m, n)$ основано на восстановлении непрерывного изображения в районе границы области O_d путем интерполяции. Контурные точки определяются как линии с уровнем яркости b_n из уравнения

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

где \mathfrak{R} – оператор яркостной интерполяции. При решении уравнения (1) рассматриваются 4 произвольные попарно соседние узловые точки изображения (m_1, n_1) , (m_2, n_1) , (m_1, n_2) , (m_2, n_2) , которые определяют прямоугольную область $D = \{ (m, n) : m \in [m_1, m_2], n \in [n_1, n_2] \}$. Если среди них существует точка, не принадлежащая $O_d \cup O_k$, то поиск контурных точек диска в области D не выполняется. Если среди точек (m_1, n_1) , (m_2, n_1) , (m_1, n_2) , (m_2, n_2) существует пара точек, одна из которых принадлежит O_k , а другая O_d , то в силу непрерывности интерполированной функции яркости линия (1) проходит через область D . При дальнейшем рассмотрении для исключения некоторых ситуаций, требующих дополнительного анализа, порог b_n считается не целым числом.

При использовании оператора билинейной яркостной интерполяции точки (m, n) линии (1) находятся из условия

$$b_{11} + (b_{21} - b_{11})\Delta m + (b_{12} - b_{11})\Delta n + (b_{11} + b_{22} - b_{12} - b_{21})\Delta m \Delta n = b_n, \quad (2)$$

где

$$\Delta m = m - m_1, \quad \Delta n = n - n_1, \quad (3)$$

b_{11} , b_{21} , b_{12} , b_{22} – значения яркости изображения $B(m, n)$ в точках (m_1, n_1) , (m_2, n_1) , (m_1, n_2) , (m_2, n_2) . Приращения $\Delta m \in [0, 1]$ задаются последовательно с шагом 0.1, и по (2) находятся соответствующие им Δn . Если $\Delta n \in [0, 1]$, то вычисляемая по (3) точка (m, n) является искомой контурной, принадлежащей области D . Аналогично при задании $\Delta n \in [0, 1]$ с шагом 0.1 находятся остальные контурные точки в области D . В процессе поиска контурных точек из рассмотрения исключаются тетрады точек, принадлежащих различным сканам.

На рисунке 3 показан пример сегментации, т.е. разделения изображения на точки диска Земли и космоса и выделения граничных точек. Для

проверки устойчивости работы процедуры отбраковки по критерию связности в исходное изображение добавлены импульсные помехи.

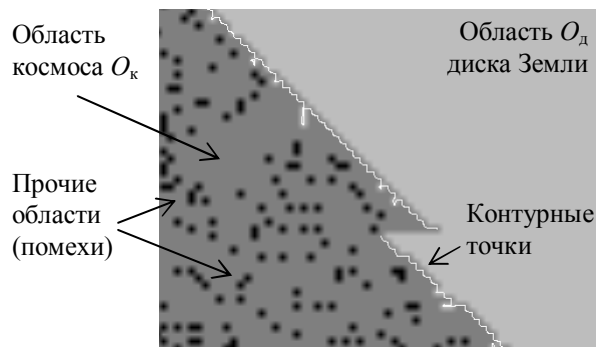


Рисунок 3 – Сегментация изображения и выделение контурных точек диска Земли

Формирование эталонного эллипса диска Земли. Вначале определяется плоскость, в которой краевые точки диска Земли образуют эллипс. В этой плоскости математически определяются эталонный эллипс и функции преобразования координат из регистрационной плоскости во вспомогательную и в плоскость выходного нормализованного изображения.

Вспомогательная плоскость и эталонный эллипс. Уравнение земного эллипсоида в гринвичской геоцентрической системе координат определяется как

$$\frac{X^2 + Y^2}{a_3^2} + \frac{Z^2}{b_3^2} = 1, \quad (4)$$

где (X, Y, Z) – координаты точки Земли; a_3 , b_3 – экваториальный и полярный радиусы земного эллипсоида. В каждой точке поверхности (4) вектор нормали выражается как $\mathbf{N} = 2(X/a_3^2, Y/a_3^2, Z/b_3^2)$. Для нахождения множества точек земной поверхности, которые на исходном изображении соответствуют контурным точкам диска Земли, определяется направляющий вектор визирующего луча $\mathbf{L} = (X - X_0, Y - Y_0, Z - Z_0)$, где (X_0, Y_0, Z_0) – координаты спутника. Условие прохождения визирующего луча датчика по касательной к поверхности эллипсоида определяется как $\mathbf{N} \mathbf{L} = 0$, откуда после преобразований получим

$$X X_0 / a_3^2 + Y Y_0 / a_3^2 + Z Z_0 / b_3^2 - 1 = 0. \quad (5)$$

Уравнение (5) определяет плоскость с задающим вектором

$$\mathbf{S} = (X_0, Y_0, Z_0 a_3^2 / b_3^2) / \sqrt{X_0^2 + Y_0^2 + Z_0^2 a_3^4 / b_3^4}.$$

Поскольку эллипсоид и любая плоскость пересекаются по эллипсу, то контурные точки изображения диска Земли находятся на эллипсе в плоскости (5).

Введем в рассмотрение вспомогательную плоскость, проходящую через точку $(0,0,0)$ параллельно плоскости (5):

$$X X_0 + Y Y_0 + Z Z_0 a_3^2 / b_3^2 = 0. \quad (6)$$

Перенесем эллипс из плоскости (5) в плоскость (6) путем проецирования из центра (X_0, Y_0, Z_0) . Анализируя (4) - (6), можно установить, что образ эллипса в плоскости (6) – также эллипс с центром $(0,0,0)$ и полуосями

$$a = a_3 \sqrt{\frac{X_0^2 b_3^2 + Y_0^2 b_3^2 + Z_0^2 a_3^2}{X_0^2 b_3^2 + Y_0^2 b_3^2 + Z_0^2 a_3^2 - a_3^2 b_3^2}}, \quad (7)$$

$$b = \sqrt{\frac{X_0^2 b_3^4 + Y_0^2 b_3^4 + Z_0^2 a_3^4}{X_0^2 b_3^2 + Y_0^2 b_3^2 + Z_0^2 a_3^2 - a_3^2 b_3^2}}. \quad (8)$$

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 (6) в центре эллипса. В этой системе эллипс описывается уравнением

$$(X')^2 / a^2 + (Y')^2 / b^2 = 1. \quad (9)$$

Таким образом, в идеальном случае (при отсутствии искажений) крайевые точки диска Земли в системе координат $X'Y'Z'$ образуют эллипс (9) с известными параметрами (7), (8). На основе анализа отклонения от эллипса (9) реальной геометрической фигуры контура диска оцениваются параметры геодезической привязки.

Пересчет крайевых точек во вспомогательную плоскость. Вначале устанавливается соответствие между системами координат XYZ и $X'Y'Z'$. Поскольку их центры совпадают, то переход от одной системы к другой есть преобразование поворота. Матрица \mathbf{M} , определяющая такой поворот, переводит систему ортогональных векторов \mathbf{A} , \mathbf{B} , \mathbf{S} соответственно в вектора $(1, 0, 0)$, $(0, 1, 0)$, $(0, 0, 1)$, поэтому она ортогональна и имеет вид

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} A_X & A_Y & A_Z \\ B_X & B_Y & B_Z \\ S_X & S_Y & S_Z \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Рассмотрим произвольную крайевую точку с координатами (m, n) . С использованием математической модели сканирования видеодатчика находится соответствующий этой точке (m, n) 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 \mathbf{M}_0 и матрицу \mathbf{M} :

$$\begin{aligned} (X'_0, Y'_0, Z'_0)^T &= \mathbf{M} \mathbf{M}_0 (X_0, Y_0, Z_0)^T, \\ \mathbf{r}' &= (r'_X, r'_Y, r'_Z)^T = \mathbf{M} \mathbf{M}_0 \mathbf{r}. \end{aligned} \quad (11)$$

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

$$X_{\Pi} = X'_0 - Z'_0 r'_X / r'_Z, \quad Y_{\Pi} = Y'_0 - Z'_0 r'_Y / r'_Z. \quad (12)$$

Преобразование крайевых точек из вспомогательной плоскости в плоскость выходного нормализованного изображения. Такое преобразование ставит в соответствие произвольной точке плоскости (6) с координатами (X_{Π}, Y_{Π}) одноименную точку выходного изображения. Для этого сначала определяются координаты точки (X_{Π}, Y_{Π}) в системе координат XYZ :

$$(X_1, Y_1, Z_1)^T = \mathbf{M}^{-1} (X_{\Pi}, Y_{\Pi}, 0)^T. \quad (13)$$

Параметрическое уравнение с параметром l для визирующего луча, проходящего от (X_0, Y_0, Z_0) к (X_1, Y_1, Z_1) , имеет вид

$$\begin{aligned} X(l) &= X_0 + (X_1 - X_0) l, \\ Y(l) &= Y_0 + (Y_1 - Y_0) l, \\ Z(l) &= Z_0 + (Z_1 - Z_0) l. \end{aligned} \quad (14)$$

При подстановке (14) в (4) получим квадратное уравнение относительно l . Подставляя его наименьшее положительное решение в (14), определяем координаты точки земной поверхности (X_3, Y_3, Z_3) и ее географические координаты:

$$\begin{aligned} \lambda &= \text{arctg}(Y_3 / X_3), \\ \varphi &= \text{arctg}(Z_3 \frac{a_3^2}{b_3^2} / \sqrt{X_3^2 + Y_3^2}). \end{aligned} \quad (15)$$

Окончательный переход от географических координат (λ, φ) к координатам плоскости выходного изображения осуществляется по стандартным формулам нормализованной геоастационарной проекции [3].

Определение параметров фактического эллипса диска Земли. Реально наблюдаемая фигура, образованная контурными точками диска Земли, может значительно отличаться от эталонного эллипса. Эти отличия обусловлены действием отмеченных выше искажающих факторов. Поэтому вначале по контурным точкам реально наблюдаемого диска Земли решается задача определения параметров эллипса. Затем путем сопоставления параметров фактического эллипса с эталонным определяются поправки к параметрам положения и ориентации спутника и

функция геометрического соответствия между реальным и эталонным эллипсом. В результате для каждой краевой точки наблюдаемого эллипса указывается одноименная точка на эталонном эллипсе. Полученные пары опорных точек пересчитываются из вспомогательной плоскости в плоскость выходного изображения и в дальнейшем используются при построении корректирующих полиномов.

Отбраковка краевых точек. Рассмотрим множество $K = \{(X_i, Y_i), i = \overline{1, N}\}$ координат контурных точек наблюдаемого диска Земли, пересчитанных во вспомогательную плоскость по формулам (11) - (12). Перед определением параметров эллипса, образованного этими точками, необходимо исключить грубые ошибки в нахождении координат. Такая процедура основана на том факте, что в идеальном случае точки лежат на эллипсе, близком к окружности, а неточности геодезической привязки в первом приближении проявляются в весьма небольших изменениях координат центра эллипса и размеров его полуосей. Рассмотрим критерии отбраковки для произвольной точки (X, Y) из множества K .

Во-первых, на основании априорно известной точности геопривязки, задается радиус $R_{\text{ц}}$ круга с центром $(0, 0)$, определяющий допустимую область расположения центра эллипса, а также допустимый диапазон изменения радиуса круга $[R_{\text{min}}, R_{\text{max}}]$. Тогда расстояние до контурной точки $r = \sqrt{X^2 + Y^2}$ должно удовлетворять условиям:

$$R_{\text{min}} - R_{\text{ц}} \leq r \leq R_{\text{max}} + R_{\text{ц}}. \quad (16)$$

Краевые точки, не удовлетворяющие (16), отбраковываются, т.е. исключаются из множества K .

Во-вторых, в окрестности рассматриваемой точки (X, Y) , задаваемой в виде круга с радиусом r_o , определяется множество соседних точек, попавших в эту область:

$$O = \{(X', Y') \in K : (X' - X)^2 + (Y' - Y)^2 < r_o^2\}.$$

Значение r_o выбирается значительно больше, чем шаг пространственной дискретизации, но значительно меньше, чем радиус окружности R_{min} . Проводится наиболее близкая к O окружность. Для этого по МНК на множестве O определяются коэффициенты уравнения $X^2 + Y^2 + aX + bY + c = 0$. Центр окружности выражается через коэффициенты a, b, c как $(-0.5a, -0.5b)$, а радиус $R = \sqrt{0.25(a^2 + b^2) - c}$.

Определяется косинус \mathcal{G} угла между вектором, направленным из точки на эталонный центр $(0, 0)$, и между вектором, направленным из точки на найденный центр:

$$\mathcal{G} = \frac{x^2 + y^2 + 0.5aX + 0.5bY}{\sqrt{(X^2 + Y^2)((X + 0.5a)^2 + (Y + 0.5b)^2)}}.$$

Значение признака \mathcal{G} характеризует направление участка контура, а R – радиус кривизны. Из множества K на основе критерия «трех сигм» отбраковываются точки, для которых признаки \mathcal{G} и R принимают аномальные значения. Краевая точка бракуется, если выполняется хотя бы одно из условий:

$$|\mathcal{G} - \bar{\mathcal{G}}| > 3\sigma_{\mathcal{G}}, |R - \bar{R}| > 3\sigma_R, \quad (17)$$

где $\bar{\mathcal{G}}$, \bar{R} и $\sigma_{\mathcal{G}}$, σ_R – соответственно средние значения и СКО для \mathcal{G} и R . Тем самым исключаются участки контура, заведомо не имеющие отношения к краям диска.

В-третьих, оставшиеся после процедуры отбраковки краевые точки преобразуются в полярную систему координат (ρ, φ) :

$$\varphi = \arctg(Y/X), r = \sqrt{X^2 + Y^2}.$$

В идеале функция $r(\varphi)$ должна быть практически постоянной. На практике, поскольку центр окружности может быть несколько смещен от центра полярной системы координат $(0, 0)$, то $r(\varphi)$ будет представлять собой плавно изменяющуюся функцию. Поэтому $r(\varphi)$ хорошо аппроксимируется рядом Фурье с малым числом членов $L \ll N_o$ по сравнению с количеством точек N_o , удовлетворяющих (16) и (17):

$$\tilde{r}(\varphi) = a_0 + \sum_{k=1}^L a_k \cos(k\varphi) + b_k \sin(k\varphi),$$

где коэффициенты $a_0, a_k, b_k, k = \overline{1, N_o}$, находятся по МНК. Заметим, что эталонный эллипс с центром $(0, 0)$ точно представляется рядом Фурье с $L = 1$.

Далее в качестве признака при отбраковке по критерию «трех сигм» используется разность $d(\varphi) = r(\varphi) - \tilde{r}(\varphi)$. Краевая точка бракуется, если

$$|d(\varphi)| > \bar{d} + 3\sigma_d, \quad (18)$$

где \bar{d} и σ_d – соответственно среднее значение и СКО, найденные по множеству отчетов функции $d(\varphi)$ в неотбракованных краевых точках.

Итак, после отбраковки краевых точек по критериям (16) - (18) формируется окончательное множество $K = \{(X_i, Y_i), i = \overline{1, N_o}\}$.

Оценивание параметров реально наблюдаемого эллипса. Как уже отмечалось, в силу малого влияния искажающих факторов следует ожидать, что контурные точки лежат на фигуре, близкой к эллипсу (9), а геометрические рассогласования в первом приближении проявляются линейно: в виде плоскопараллельного смещения, поворота и изменения масштаба. При таких преобразованиях эллипс переходит снова в эллипс.

Опишем произвольный эллипс в виде уравнения:

$$X^2 + gXY + cY^2 + dX + eY + f = 0. \quad (19)$$

Искомые параметры эллипса выражаются через коэффициенты уравнения (19) как

$$\begin{aligned} X_{\text{ц}} &= (eg - 2cd)/(4c - g^2), \\ Y_{\text{ц}} &= (dg - 2e)/(4c - g^2); \end{aligned} \quad (20)$$

$$\varphi = 0.5 \arctg \frac{g}{1-c},$$

$$a_{\text{д}}, b_{\text{д}} = \sqrt{\frac{2(cd^2 + fg^2 + e^2 - edg - 4cf)}{(4c - g^2)(1 + c \pm \sqrt{(1-c)^2 + g^2})}}, \quad (21)$$

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

Физический смысл левой части (19) становится понятным, если эллипс близок к окружности, т.е. при $g \approx 0, c \approx 1$. В этом случае левая часть (19) приводится к виду $(X - X_{\text{ц}})^2 + (Y - Y_{\text{ц}})^2 - R^2$, т.е. пропорциональна расстоянию от точки (X, Y) до окружности. Таким образом, используя левую часть (19) как меру близости точки к эллипсу, можно определить коэффициенты (19) на основе исходных данных множества K по МНК.

Формирование опорных точек местности. После нахождения параметров реального эллипса, аппроксимирующего крайевые точки диска Земли, геометрическое соответствие одноименных точек реального и эталонного эллипсов определяется выражениями:

$$X' = [(X - X_{\text{ц}}) \cos \varphi + (Y - Y_{\text{ц}}) \sin \varphi] a / a_{\text{д}},$$

$$Y' = [(Y - Y_{\text{ц}}) \cos \varphi - (X - X_{\text{ц}}) \sin \varphi] b / b_{\text{д}}, \quad (22)$$

где (X', Y') и (X, Y) – одноименные точки, принадлежащие соответственно эталонному и реальному эллипсам. По этим формулам выполняется пересчет координат каждой краевой точки (X_i, Y_i) , $i = \overline{1, N_o}$, в одноименную точку (X'_i, Y'_i) . В дальнейшем координаты пар этих одноименных точек преобразуются по (13)-(15) в плоскость нормализованного изображения, где ис-

пользуются для построения полиномов геопривязки по МНК.

Коррекция навигационных параметров. Уточнить параметры геопривязки можно не только с помощью построения полиномов геопривязки, но и путем коррекции исходных навигационных параметров: положения и углов ориентации спутника [4]. Заметим, что проекция эталонного эллипса на вспомогательную плоскость (6) практически совпадает с его проекцией на плоскость

$$X X_0 + Y Y_0 + Z Z_0 = 0. \quad (23)$$

Действительно, для земного эллипсоида $a_3^2 / b_3^2 \approx 1.0068$, и для геостационарной орбиты отклонение подспутниковой точки от экватора $|Z_0| < 200$ км, а удаление от центра Земли $\sqrt{X_0^2 + Y_0^2} \approx 42000$ км. Расчеты показывают, что возникающие при переходе от (6) к (23) ошибки не превосходят 36 м, чем можно пренебречь. Поскольку плоскость (23) перпендикулярна лучу, соединяющему спутник и центр Земли, из элементарных геометрических соображений находят поправки к углам ориентации спутника – тангажа, крена и рысканья:

$$\Delta \alpha = \arctg X_{\text{ц}} / \sqrt{X_0^2 + Y_0^2 + Z_0^2},$$

$$\Delta \omega = \arctg Y_{\text{ц}} / \sqrt{X_0^2 + Y_0^2 + Z_0^2}, \quad (24)$$

$$\Delta \chi = \varphi.$$

Отклонение найденных полуосей $a_{\text{д}}, b_{\text{д}}$ эллипса диска Земли от соответствующих полуосей a, b эталонного эллипса (9) свидетельствует об ошибке измерения расстояния спутника от центра Земли $\sqrt{X_0^2 + Y_0^2 + Z_0^2}$ и об ошибке измерения отклонения подспутниковой точки от экватора Z_0 . Влияние ошибок измерения углов ориентации на отклонения полуосей $a_{\text{д}}, b_{\text{д}}$ от их эталонных значений пренебрежимо мало, поскольку эти ошибки вызывают, главным образом, плоскопараллельные смещения эллипса.

В силу того, что координаты X_0, Y_0 совместно входят в (7), (8) в виде члена $X_0^2 + Y_0^2$, коррекция их по отдельности невозможна. Напротив, коррекция координаты Z_0 возможна, ибо в соответствии с (7), (8) отношение полуосей эллипса $k = a/b$ зависит от Z_0 . Однако для орбиты, лежащей в плоскости экватора, обусловленность задачи оценки Z_0 совершенно неудовлетворительная, так как поправка $\Delta Z = \Delta k / (\partial k / \partial Z)$, а в плоскости экватора для земного эллипсоида $\partial k / \partial Z = 0$. Поэтому пред-

ставляется возможным скорректировать только высоту полета спутника путем умножения его координат (X_0, Y_0, Z_0) на усредненный по осям коэффициент изменения масштаба $0.5(a/a_d + b/b_d)$.

Коррекция модели датчика. Если в процессе летных испытаний будет выявлено значимое отклонение коэффициента a_d/b_d от эталонного значения $k = a/b$, то это свидетельствует о неправильном задании масштабных коэффициентов развертки датчика по кадру и строке. На основе анализа соотношений полуосей реального и эталонного эллипсов становится возможным уточнить масштабы развертки в кадровом и строчном направлениях в программной модели датчика.

Полагая угол рыскания спутника и соответствующий ему установочный угол датчика достаточно малыми, внесем поправку в функцию сканирования датчика $\mathbf{r}(m, n) = (r_x, r_y, r_z)$ путем умножения компоненты r_y на поправочный коэффициент $\varepsilon = (a_d/b_d)/k$. На практике значение ε получается путем усреднения $(a_d/b_d)/k$ за сутки. В дальнейшем при уточнении привязки и нормализации изображений следует использовать скорректированные значения масштабов развертки по строке и кадру.

Меры по увеличению точности оценивания параметров эллипса. Поскольку отношение полуосей a_d/b_d является практически постоянным, т.е. $a_d/b_d = k$, то можно повысить точность определения других параметров эллипса в уравнении (19). Из $a_d/b_d = k$ и (21) следует, что

$$(1-c)^2 + g^2 = (1+c)^2 \lambda, \quad (25)$$

$$\lambda = \left((k^2 - 1)/(k^2 + 1) \right)^2.$$

При подстановке в (25) выражения для угла φ из (21) получаются выражения для определения c и g по λ и φ :

$$c = \frac{-(\lambda + 1 + \operatorname{tg}^2 \varphi) \pm 2\sqrt{\lambda(1 + \operatorname{tg}^2 \varphi)}}{(\lambda - 1 - \operatorname{tg}^2 \varphi)}, \quad (26)$$

$$g = (1-c) \operatorname{tg} \varphi. \quad (27)$$

Таким образом, при фиксированном φ нахождение параметров g и c осуществляется по (26), (27). Определить остальные параметры d, e, f можно по МНК, подставив предварительно найденные по (26), (27) значения g и c в (19). Для нахождения параметра φ организуется численный поиск, при котором в качестве мини-

мизируемой целевой функции $f(\varphi)$ выступает сумма квадратов невязок (19):

$$f(\varphi) = \sum_{(x,y) \in K} (x^2 + gxy + cy^2 + dx + ey + f)^2.$$

В случае недостаточного количества краевых точек (при частичном затемнении диска Земли) точность оценки угла φ может стать неудовлетворительной. Тогда целесообразно отказаться от оценки этого параметра, исключив процедуру численного поиска и приняв $\varphi = 0$.

Заключение. Рассмотренные алгоритмы и технология геодезической привязки спектральных изображений по контурным точкам диска Земли апробированы на модельных изображениях, полученных путем преобразования снимков со спутника «MeteoSat-8» и имитации характерных искажений. По результатам выполненных исследований можно сделать следующие основные выводы.

Во-первых, даже в условиях действия интенсивных помех в виде импульсного и аддитивно-мультипликативного шума обеспечивается точность оценивания углов крена и тангажа до ~ 3 угл. с. и смещения диска Земли порядка 0,5 шага пространственной дискретизации. Если учесть, что точность измерения этих углов с помощью бортовой системы ориентации на практике составляет 1-2 угл. мин (это соответствует смещению центра диска на 10-20 пикселей), то полученный результат является исключительно важным.

Во-вторых, точность оценивания угла рыскания χ составила порядка ~ 200 угл. с. даже при отсутствии шумов. Это связано с тем, что эллипс диска Земли практически вырожден в окружность. При этом установлено, что эти ошибки незначимо влияют на точность геодезической привязки. Поэтому выполнять оценку этого угла следует только в случае, когда точность его измерения с помощью системы ориентации спутника значительно хуже 200 угл. с.

В-третьих, при измерении высоты спутника обнаружена значительная систематическая ошибка (десять километров), так как действие атмосферы приводит к увеличению видимого радиуса диска. Эта ошибка может быть учтена и скомпенсирована. В этом случае точность коррекции высоты будет составлять порядка 1.5 км, что вполне достаточно для высокоточной геодезической привязки изображений с геостационарных спутников.

В-четвертых, экспериментально установлено, что указанные точности оценки параметров геодезической привязки обеспечиваются даже при 80 % затемнении диска Земли.

Рассмотренные алгоритмы и технологии положены в основу программного комплекса геодезической привязки видеоинформации с геостационарного спутника, проектируемого в настоящее время по проекту «Электро-Л». В качестве вычислительных средств в этом проекте выбрана серверная ЭВМ IBM x3850 с 4-мя двухъядерными процессорами Intel Xeon 7120N 4x3.0GHz / 667 MHz, обеспечивающая при эффективном распараллеливании вычислительного процесса 25 млрд. операций в секунду и имеющая оперативную память 8 Гбайт. Время решения рассмотренных выше задач геодезической привязки по контурным точкам диска для полного потока данных в 1.5 Гб составило 10 с.

Библиографический список

1. Злобин В.К., Еремеев В.В. Обработка аэрокосмических изображений. М.: Физматлит, 2006. 288 с.
2. Еремеев В.В., Егюшкин Н.А., Москвитин А.Э. Алгоритмы обработки изображений от геостационарных спутников // Тез. докл. 5-й междунар. науч.-техн. конф. «Космонавтика. Радиоэлектроника. Геоинформатика». Рязань, 2007. С. 241-242.
3. LRIT/HRIT Global Specification. CGMS 03. Issue 2.6. Coordination Group for Meteorological Satellites. August 1999.
4. 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.