

УДК 004.932

ТЕХНОЛОГИЯ ВИЗУАЛЬНОГО ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО ОРИЕНТИРОВАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Кочергин А.М., к.т.н., с.н.с. НИИ "Фотон" РГРТУ, e-mail: foton@rsreu.ru

Кузнецов А.Е., д.т.н., заместитель директора НИИ "Фотон" РГРТУ

Побаруев В.И., к.т.н., с.н.с. НИИ "Фотон" РГРТУ

Шокол А.С., аспирант, и.о. начальника НЦ ОМЗ ОАО «Российские космические системы», e-mail: ntsomz@ntsomz.ru

Ключевые слова: дистанционное зондирование земли, геодезическое ориентирование, технология, маршрутные съемки.

Рассматривается технология визуального геодезического ориентирования космических снимков земной поверхности и математическая модель, лежащая в ее основе.

Введение

Во всех системах дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) операции геодезического ориентирования протяженных маршрутов съемки отводится важная роль, поскольку требуется оперативно оценить точность геопривязки представленных на снимке объектов к местности. При этом если координатные рассогласования достаточно велики, то необходимо уточнить параметры внешнего ориентирования снимка с целью последующего адресного размещения информации в электронном каталоге и корректного формирования выходных информационных продуктов стандартных уровней обработки.

В системном плане операция геодезического ориентирования маршрутов съемки должна выполняться максимально быстро в комплексе предварительной обработки данных ДЗЗ. В комплексе создания стандартных продуктов так же может выполняться геодезическое ориентирование, но уже не целых маршрутов, а отдельных кадров с более высокой точностью, на основе большого количества опорных точек. Таким образом, задачей геодезического ориентирования маршрутов съемки по минимальному числу опорных точек является контроль точности и компенсация возможных грубых ошибок геопривязки видеоданных. Поскольку маршруты съемки представляют собой изображения земной поверхности сверхбольших объемов (до нескольких сотен гигабайт), то к технологии геодезического ориентирования предъявляются высокие требования по производительности и удобству в работе.

Технология визуального геодезического ориентирования

Анализ грубых ошибок координатной привязки целевой информации от спутниковых систем «Ресурс-01», «Метеор-М», «Ресурс-ДК» и др. показывает, что основным источником погрешностей являются неточности заданий начальных условий, описывающих положение КА в пространстве и задаваемых вектором $\boldsymbol{\eta}(t_0)$, времени формирования первой строки изображения t_0 и углового положения спутника. Причем грубые ошибки, вы-

званные неточным угловым положением КА, могут быть скомпенсированы поправкой к вектору $\boldsymbol{\eta}(t_0)$. Исходя из этого повысить точность геопривязки маршрута съемки можно, используя всего нескольких опорных точек (в пределе одну), для уточнения отдельных параметров кеплеровской орбиты спутника.

Если взять за основу технологию прецизионного геодезического ориентирования, используемую на этапе создания ортопланов, то выполнить контроль и коррекцию геопривязки маршрута съемки можно так, как это показано на рис. 1. В соответствии с этой схемой на основе углового положения сканера, задаваемого вектором $\mathbf{R}_c(t)$, для каждого пикселя исходного снимка

$B(m, n)$, $m = \overline{1, M}$, $n = \overline{1, N}$, рассчитываются функции вычисления геодезических координат:

$$\phi = f_\phi [\mathbf{R}_c, \boldsymbol{\eta}(t_0), m, n],$$

$$\lambda = f_\lambda [\mathbf{R}_c, \boldsymbol{\eta}(t_0), m, n]. \quad (1)$$

Далее, на экране монитора отображается исходное изображение $B(m, n)$ и геокодированная карта $E(\phi, \lambda)$. Оператор, просматривая снимок и карту, идентифицирует опорные точки (ОТМ) с координатами $(\phi, \lambda)_i$ и $(\phi^*, \lambda^*)_i$, $i = 1, 2, \dots$. Полученные рассогласования пересчитываются в линейные величины $(\Delta x, \Delta y)_i$, на основе которых вычисляются поправки к орбитальным параметрам $\Delta \boldsymbol{\eta}$ и времени съемки первой строки Δt_0 .

Нетрудно заметить, что данная технология весьма ресурсоемкая, поскольку оператору необходимо анализировать большие массивы видеоданных для поиска одноименных объектов на снимке и карте. При этом требования к числу ОТМ и месту их расположения в значительной степени влияют на точность геопривязки маршрута. Поэтому предлагается более эффективная - так называемая, технология визуального геодезического ориентирования, схема которой приведена на рис. 2. Основная ее идея состоит в том, что для контроля геопривязки используется сжатое изображение B^* , которое трансформируется в плоскость карты (снимок D_B). За-

тем снимок D_B и карта (изображение D_E) полупрозрачно совмещаются с коэффициентом полупрозрачности q . Оператор с помощью курсора плоско-параллельно смещает снимок относительно карты, добиваясь наилучшего совмещения одноименных объектов по всему изображению земной поверхности. Величина смещения $\Delta x, \Delta y$ используется для вычисления поправок $\Delta \eta, \Delta t_0$.

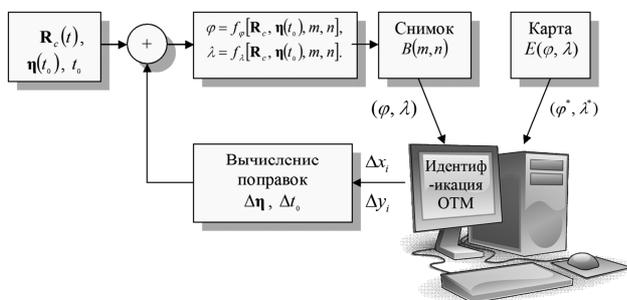


Рис. 1. Технологическая схема геодезического ориентирования на основе ОТМ

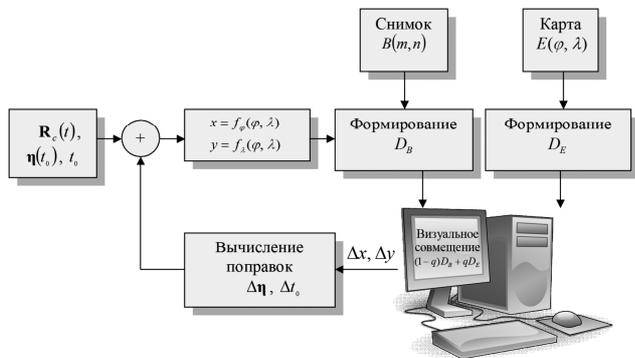


Рис. 2. Схема выполнения операций при визуальном геодезическом ориентировании

Таким образом, благодаря тому, что для анализа используется изображение меньшего объема B^* и не требуется находить отдельные ОТМ обеспечивается высокая автоматизация и оперативность процесса контроля и геодезического ориентирования маршрута съемки.

Математическая модель визуального геодезического ориентирования

Рассмотрим основные математические соотношения, лежащие в основе процедуры геодезического ориентирования.

Зададим географическими координатами $(\phi_{\min}, \lambda_{\min})$, $(\phi_{\max}, \lambda_{\max})$ область определения синтезируемого изображения

$$D(x, y), \quad x = \overline{1, X}, \quad y = \overline{1, Y},$$

где $X = (x_{\max} - x_{\min})/\mu$, $Y = (y_{\max} - y_{\min})/\mu$,
 $x_{\min} = f_x(\phi_{\min})$, $y_{\min} = f_y(\lambda_{\min})$, $x_{\max} = f_x(\phi_{\max})$,
 $y_{\max} = f_y(\lambda_{\max})$, μ - масштаб отображения,
 f_x, f_y - функции картографического преобразования.

Для проекции Меркатора

$$x = f_x(\phi) = \frac{R \cos \phi_c}{0,4343} \lg \operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right), \quad (2)$$

$$y = f_y(\lambda) = R \cos \phi_c \lambda,$$

где ϕ_c - широта стандартной параллели, $\phi_c = (\phi_{\max} - \phi_{\min})/2$; R - радиус земного эллипсоида на широте ϕ_c .

Изображение B^* сформируем путем интегрального сжатия исходного снимка B с коэффициентом w :

$$B^*(m', n') = \frac{1}{w^2} \sum_{m=w(m'-1)+1}^{m'w} \sum_{n=w(n'-1)+1}^{n'w} B(m, n),$$

где m', n' - координаты элемента сжатого изображения. Величина коэффициента сжатия $w > 1$ определяется из условия: $MN/w^2 \leq V_{on}$, где V_{on} - объем доступной оперативной памяти. Далее выполним трансформирование сжатого изображения B^* в плоскость снимка D . При этом из-за масштабных изменений трансформирование по прямым зависимостям приводит к появлению на результирующем изображении «пустот», снижающих контраст и соответственно дешифрируемость изображения. Поэтому процесс геометрического преобразования изображения B^* выполним на основании обратных зависимостей:

$$B(x, y) = \begin{cases} B^*(m', n'), & (wm' \in [1, M]) \text{ и } (wn' \in [1, N]); \\ \text{иначе } b_{\max}, & \end{cases}$$

где $m' = \operatorname{ent} [F_m(x, y)/w]$, $n' = \operatorname{ent} [F_n(x, y)/w]$;

F_m, F_n - функции, устанавливающие связь систем координат изображений B и D на основе выражений (1), (2).

Поскольку соотношения (1), (2), как правило, не допускают аналитического обращения, то в расчетах используем их полиномиальные аппроксимации. Для получения высокоточных полиномиальных приближений исходных функций F_m, F_n разработана трехэтапная процедура, основанная на использовании промежуточной проекции, обладающей минимальными искажениями относительно системы координат исходного снимка. На первом этапе рассчитываются географические координаты элемента (x, y) на основе аналитических зависимостей, полученных путем обращения выражений (2):

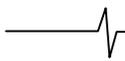
$$\phi = f_x^{-1}(\mu x + x_{\min}), \quad \lambda = f_y^{-1}(\mu y + y_{\min}) \quad (3)$$

На втором этапе выполняется пересчет координат (ϕ, λ) в косую равнопромежуточную цилиндрическую проекцию (КРЦП). Для этого осуществляем переход от геодезической (ϕ, λ) к геоцентрической (ϕ', λ') системе координат:

$$\phi' = \operatorname{arc} \sin \left(\sin \phi \sqrt{1-e^2} / \sqrt{1-e^2 \sin^2 \phi} \right), \quad (4)$$

$$\lambda' = \lambda,$$

где e - эксцентриситет земного эллипсоида. Далее оп-



ределяются значения широты ϕ_0 и долготы λ_0 полюса косо́й сферической системы координат:

$$\phi_0 = \frac{\pi}{2} - i, \quad \lambda_0 = L - \frac{\pi}{2} \quad (5)$$

где $L = \gamma - w_3 \frac{M}{2} t_c$, γ – долгота восходящего узла по отношению к гринвичскому меридиану на момент формирования первой строки сюжета t_0 , w_3 – скорость вращения Земли, t_c – период сканирования, i – угол наклона орбиты. Далее выполняется переход от прямых (ϕ', λ') к косым (ϕ'', λ'') сферическим координатам:

$$\begin{aligned} \phi'' &= \arcsin \left[\sin \phi' \sin \phi_0 + \cos \phi' \cos \phi_0 \cos (\lambda_0 - \lambda') \right], \\ \lambda'' &= \arcsin \operatorname{tg} \left[\frac{\cos \phi' \sin (\lambda_0 - \lambda')}{\sin \phi' \cos \phi_0 - \cos \phi' \sin \phi_0 \cos (\lambda_0 - \lambda')} \right]. \end{aligned} \quad (6)$$

После этого вычисляются координаты пикселя (u, v) в КРПЦ по формулам:

$$u = R_3 \lambda'', \quad v = R_3 \phi'' \quad (7)$$

где R_3 – радиус Земли на экваторе.

На третьем этапе выполняем пересчет значений u и v в систему координат изображения B :

$$\begin{aligned} m &= \sum_{\rho=0}^P \sum_{\nu=0}^{\rho} a_{\nu, \rho-\nu} u^{\nu} v^{\rho-\nu}, \\ n &= \sum_{\rho=0}^P \sum_{\nu=0}^{\rho} c_{\nu, \rho-\nu} u^{\nu} v^{\rho-\nu}, \end{aligned} \quad (8)$$

где $(a_{\rho\nu}, c_{\rho\nu})$ – коэффициенты полинома, рассчитанные по методу наименьших квадратов.

Таким образом, формулы (3)-(8) определяют вид иско́мых функций F_m и F_n . Апробация данной технологии на протяженных маршрутах, полученных со спутника «Ресурс-О1», показала, что использование в формуле (8) полинома 3-й степени обеспечивает погрешность в пересчете координат не более 0,5 пикселя.

Рассмотрим теперь процесс нанесения на изображение D векторной электронной карты. В качестве картографической основы используем гидрографический слой, который характеризуется высокой временной устойчивостью и хорошо различим на космических снимках. Электронная карта представляется множеством линейных объектов $E = \{ (\phi_s^H, \lambda_s^H; \phi_s^K, \lambda_s^K); s = \overline{1, S} \}$, принадлежащих выбранному региону, где (ϕ_s^H, λ_s^H) и (ϕ_s^K, λ_s^K) – соответственно географические координаты начальных и конечных точек s -го объекта. Выполним пересчет элементов множества E в систему координат изображения D : $E \rightarrow E_d = \{ (x_s^H, y_s^H; x_s^K, y_s^K); s = \overline{1, S} \}$, где $x_s = (f_x(\phi_s) - x_{\min}) / \mu$, $y_s = (f_y(\lambda_s) - y_{\min}) / \mu$, и осуществим их векторно-растровое отображение: $D_E(x, y) = b_e$, если

$(x, y) \in (x_s^H, y_s^H; x_s^K, y_s^K)$, $s = \overline{1, S}$, где b_e – код яркости объектов карты.

Операция полупрозрачного совмещения снимка и карты описывается выражением

$$D = (1 - q)D_B + qD_E,$$

где q – коэффициент прозрачности, находящийся в диапазоне от 0 до 1 и устанавливаемый оператором. По результатам совмещения определяется взаимный сдвиг снимка и карты $(\Delta x, \Delta y)$, используемый для расчета поправок $\Delta \eta$.

При коррекции параметров орбиты из всех кеплеровских компонентов вектора $\eta(t_0) = [\eta_k(t_0)]$, $k = \overline{1, K}$, выбираются лишь те, ошибки которых вносят наибольшую погрешность географической привязки, а именно: время прохождения перицентра τ , долгота восходящего узла Ω и наклонение орбиты i . Их уточнение осуществляется на основе координат ОТМ, представленных в КРПЦ, которая обладает минимальными искажениями по отношению к системе координат снимка. Эта особенность позволяет обеспечить работоспособность алгоритма при малом числе ОТМ.

На основе соотношений (3)-(8) ОТМ пересчитываются в область определения исходного изображения и в систему координат КРПЦ. В результате формируются два множества $O_b = \{ m, n; m^*, n^* \}$, и $O_k = \{ u, v; u^*, v^* \}$. С учетом выражений (1) и (4)-(7) функциональная связь между компонентами этих множеств определяется как

$$\begin{aligned} u &= F_u(\eta(t_0), m, n) = \Phi_u(f_\phi, f_\lambda), \\ v &= F_v(\eta(t_0), m, n) = \Phi_v(f_\phi, f_\lambda), \end{aligned} \quad (9)$$

где Φ_u, Φ_v – функции координатных преобразований, определяемые формулами (4) - (7).

Обозначим элементы множества O_k в виде векторов $\mathbf{r} = (u, v)$ и $\mathbf{r}^* = (u^*, v^*)$. Тогда в общем случае:

$$\Delta \mathbf{r} = \mathbf{r}^* - \mathbf{r} = \mathbf{F}[\eta(t_0) + \Delta \eta, m, n] - \mathbf{F}[\eta(t_0), m, n],$$

где $\mathbf{F} = (F_u, F_v)$, $\Delta \eta = (\Delta \eta_k; k = \overline{1, K})$ – иско́мый вектор орбитальных поправок. Разложим правую часть данного соотношения в ряд Тейлора относительно компонентов вектора $\Delta \eta$, ограничившись линейными членами. В результате получим систему линейных уравнений относительно иско́мых величин $\Delta \eta_k$:

$$\Delta \mathbf{r}_j = \sum_{k=1}^K \left. \frac{\partial \mathbf{F}[\eta(t_0) + \Delta \eta, m_j, n_j]}{\partial \eta_k} \right|_{\Delta \eta=0} \cdot \Delta \eta_k, \quad (10)$$

$$k = \overline{1, K}.$$

Значения производных находим через конечные разности:

$$\frac{\partial \mathbf{F}(j)}{\partial \eta_k} = \frac{\mathbf{F}[\eta(t_0) + \varepsilon_k, m_j, n_j] - \mathbf{F}[\eta(t_0), m_j, n_j]}{\varepsilon_k},$$

где ε_k - достаточно малое приращение параметра η_k по отношению к $\Delta\eta_k$.

Система (10) при $J \geq K$ решается с помощью метода наименьших квадратов. Однако для $J = 1$ или $J = 2$ при $K = 3$ система не имеет решения. Работоспособность алгоритма обеспечивается в этом случае следующим образом.

Известно, что изменение времени прохождения перицентра τ , главным образом, оказывает влияние на значения координат в продольном направлении маршрута, а изменение долготы восходящего узла Ω - на смещениях в поперечном направлении. С учетом этого поправка $\Delta\eta_1 = \Delta\tau$ оценивается как

$$\Delta\tau = (u^* - u) / \frac{\partial F_u}{\partial \tau}.$$

Оставшееся приращение $\Delta\Omega$ определяем из уравнения

$$\Delta v = \frac{\partial F_v}{\partial \Omega} \Delta\Omega.$$

Полученные поправки $\Delta\eta = (\Delta\tau, \Delta\Omega)$ используются для коррекции вектора начальных условий $\Delta\eta(t_0)$.

Заключение

Рассмотренная технология уже много лет успешно используется в НЦ ОМЗ и ряде других приемных центров при первичной обработке и каталогизации данных КА «Ресурс-ДК», «Монитор-Э», «Метеор-М» № 1. На рис. 3 показан пользовательский интерфейс, обеспечивающий визуальное ориентирование снимка относительно карты. В качестве опоры используется векторная электронная карта DCW масштаба $1:10^6$. Достижимая при этом точность геопривязки снимка оказывается даже выше точности карты (например, для снимков КА «Ресурс-ДК» это не хуже 100м), поскольку интегральное совмещение всего маршрута с картой позволяет минимизировать ошибки представления на карте отдельных объектов.

THE TECHNOLOGY OF EARTH OBSERVATION IMAGES VISUAL GEODESIC ORIENTATION

*Kochergin A.M., Kuznetsov A.E.,
Pobaruev V.I., Shokol A.S.*

In the article are described the technology of Earth observation images visual geodesic orientation and mathematical model it based on.

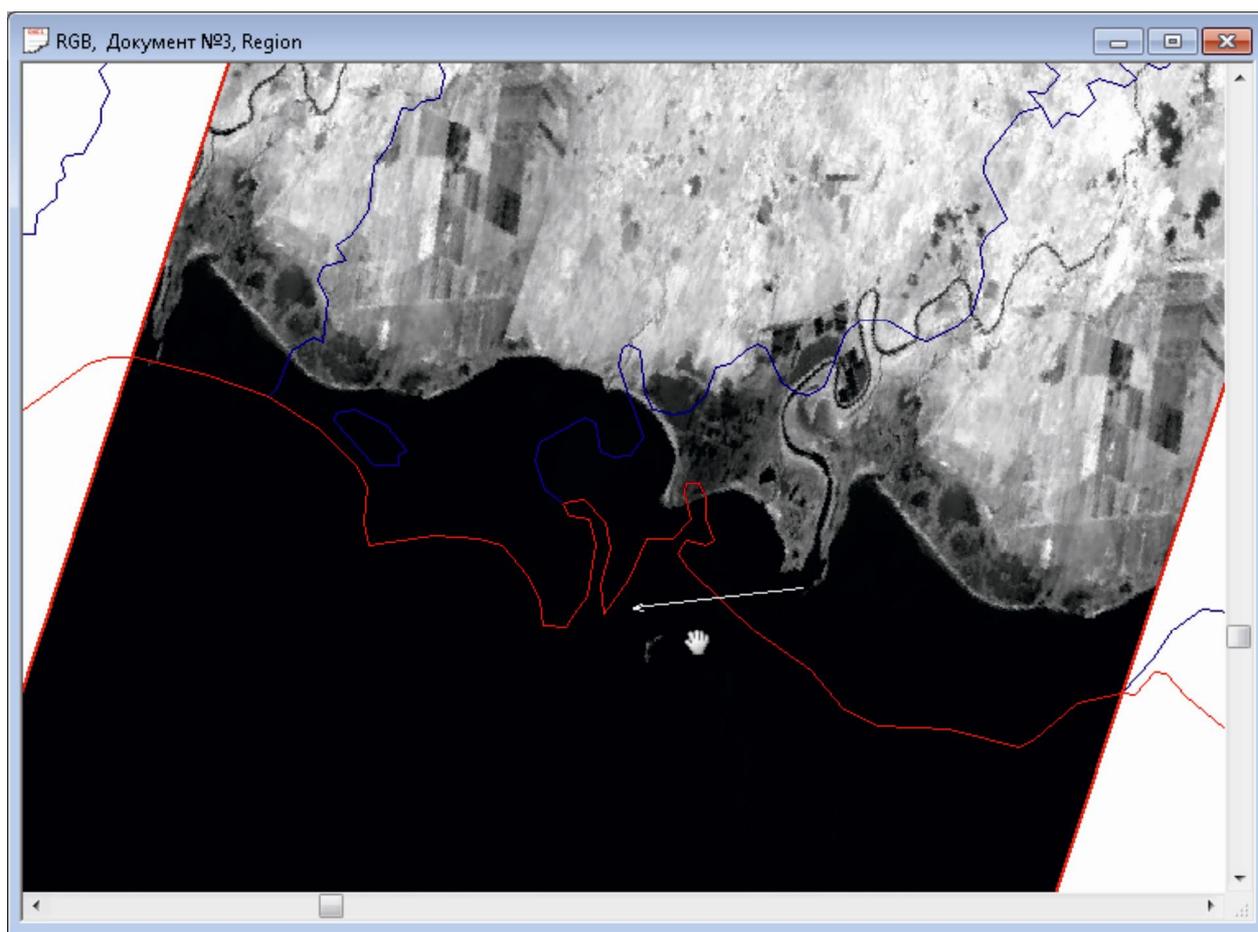


Рис. 3. Интерфейс пользователя по визуальному совмещению снимка и карты.
Ошибки геопривязки устраняются плоско-параллельным смещением снимка относительно карты