

МЕТОД ОПЕРАТИВНОГО ОРТОТРАНСФОРМИРОВАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПРИ НЕДОСТАТКЕ ОПОРНОЙ ИНФОРМАЦИИ

© 2016 А. В. Спирин, Н. И. Руднев, Н. К. Пастух, И. И. Шуклин

Федеральное государственное унитарное предприятие «18 Центральный научно-исследовательский институт» Министерства обороны Российской Федерации, г. Москва

Приведён метод оперативного ортотрансформирования космических изображений, построенный на комплексировании орбитального и полиномиального методов фотограмметрической обработки изображений. Идея метода заключается в фрагментарном формировании ортоизображения. На космических изображениях выделяются фрагменты (четырёхугольники) таких размеров, геометрические связи между элементами которых с достаточной точностью описываются двумерным полиномом первого порядка. Соседние фрагменты имеют общие вершины по линии соприкосновения, что обеспечивает целостность формируемого ортоизображения. Положение фрагмента (координат его вершин) определяется орбитальным методом с учётом рельефа местности, что при малых размерах фрагментов обеспечивает учёт рельефа для всех точек фрагмента. Для возможности использования орбитального метода применяются операции по определению начальных значений углов ориентации бортовой специальной аппаратуры космического аппарата и законов изменения этих углов в процессе съёмки с последующим уточнением этих величин на основе координат четырёх опорных точек. Соответствие между толерантными точками фрагментов исходного и формируемого изображения осуществляется на основе моделей, реализация которых имеет меньшую вычислительную сложность по сравнению с реализацией на основе орбитальных методов. Экспериментальная апробация предлагаемого метода показала, что использование метода оперативного ортотрансформирования позволило в среднем сократить более чем в 4 раза время проведения фотограмметрической обработки космических изображений при сопоставимой точности получения результирующего изображения.

Дистанционное зондирование Земли, космическое изображение, фотограмметрическая обработка, орбитальный метод, полиномиальный метод, ортотрансформирование.

В настоящее время наблюдается развитие оптико-электронных средств дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), обеспечивающих получение видовых материалов на требуемые территории и объекты местности. Отличительной особенностью этих средств является высокая производительность, а также возможность получения космических изображений (КИ) с пространственным разрешением, превышающим 50 см [1]. Это обуславливает формирование значительного потока материалов ДЗЗ, направляемого на фотограмметрическую обработку (ФГО), что создало предпосылки для предъявления

следующих основных требований, предъявляемых к ФГО КИ:

1) времени создания результирующего ортотрансформированного изображения (порядка 3–5 мин на Гбайт исходного КИ);

2) точности его геометрического построения и координатной привязки (ошибка координатной привязки не более 7–15 м);

3) необходимой для выполнения ФГО опорной информации (определяется используемым методом ФГО).

Объективная реальность в освоении новых территорий ведёт к возрастанию

Цитирование: Спирин А.В., Руднев Н.И., Пастух Н.К., Шуклин И.И. Метод оперативного ортотрансформирования космических изображений при недостатке опорной информации // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). 2016. Т. 15, № 2. С. 190-199. DOI: 10.18287/2412-7329-2016-15-2-190-199

удельного веса в съёмке этих территорий отечественными средствами ДЗЗ («Ресурс-П») и другие перспективные космические аппараты (КА)) и фотограмметрической обработке изображений, получаемых с них. Ограниченность опорной информации на эти территории приводит к тому, что использование большинства методов [2] ФГО не позволяет сформировать ортоизображение с заданными требованиями.

При этом орбитальные методы фотограмметрической обработки КИ позволяют формировать геометрически правильное ортоизображение без привлечения опорных точек с точностью координатной привязки, обеспечиваемой точностью определения значений параметров проведения съёмки. В целом данная группа методов удовлетворяет требованиям 2) и 3), что делает перспективным их использование как основы для поиска путей выполнения ФГО КИ с соблюдением всех вышеприведённых требований. Основным недостатком формирования ортоизображения орбитальным методом является весьма большая ресурсоёмкость в силу необходимости использования строгих моделей при проведении вычислительных операций с большим количеством точек (пикселей) изображения (порядка 10^9 и более) [3]. Такие временные затраты на формирование ортоизображений являются неприемлемыми.

Следует отметить, что при наличии подготовленного набора опорных точек ФГО КИ на основе полиномиальных методов [2] осуществляется быстрее, чем на основе орбитальных методов, за счёт использования меньшего количества вычислительных операций при ФГО, что создаёт предпосылки для комбинирования данных методов.

Потребность в использовании возможностей орбитальных методов для фотограмметрической обработки КИ и несоответствие их требованиям оперативности делает актуальным поиск путей сокращения времени выполнения ФГО на основе этих методов.

В связи с этим целью настоящей работы является разработка метода, использование которого при сохранении возможностей и принципов орбитальных методов позволило бы сократить время формирования ортоизображений без ухудшения изобразительных и измерительных характеристик.

Достижение поставленной цели, по мнению авторов, возможно при комплексировании орбитальных и полиномиальных методов ФГО КИ, которое на основе сочетания особенностей этих методов позволит формировать ортоизображение с требуемыми характеристиками за требуемое время при минимуме опорной информации.

Решение поставленной задачи будем осуществлять на основе следующих допущений:

1) имеется исходное КИ, которое представляет некоторое упорядоченное множество S размерности $K \times N$, а каждому элементу (k, n) сопоставлена оптическая плотность $d_{k,n}$ отображаемого элементарного участка земной поверхности:

$$S = \{ \langle k, n, d_{kn} \rangle \},$$

$$k = \overline{1, K}; \quad n = \overline{1, N}; \quad d_{kn} \in [0, D_{\max}];$$

2) сформирована геометрическая структура формируемого ортоизображения

$$S_r^* = \{ \langle k^*, n^* \rangle \},$$

$$k^* = \overline{1, K^*}, \quad n^* = \overline{1, N^*}, \quad (X_o, Y_o), (\Delta r_x, \Delta r_y),$$

которая характеризуется размерностью $K^* \times N^*$, началом отсчёта в земных координатах (X_o, Y_o) , регулярностью элементарных участков земной поверхности с задаваемым линейным разрешением $(\Delta r_x, \Delta r_y)$;

3) цифровая модель рельефа Φ позволяет для каждой точки земной поверхности (x, y) определить высоту H относительно уровня моря:

$$H = \Phi(x, y);$$

4) имеется модель F_1 определения координат точек земной поверхности по космическому изображению орбитальным методом [3], которая ставит в однозначное соответствие для каждой точки (пикселя) изображения (k, n) соответствующие ей координаты земной поверхности (x, y) в заданной системе координат:

$$F_1: (k, n) \rightarrow (x, y) \begin{cases} (X, Y, Z) = f_1(\tau(k, n)), \\ (\alpha, \beta, \kappa) = f_2(\tau(k, n)), \\ (x, y) = f_3(f_1, f_2, \Phi), \end{cases}$$

$$(k, n) \in S, (x, y) \in S^*,$$

где $\tau(k, n)$ – геометрическая модель бортовой специальной аппаратуры; $f_1(\tau)$ – модель поступательного движения КА; $f_2(\tau)$ – модель вращательного движения КА; Φ – цифровая модель рельефа; $f_3(f_1, f_2, \Phi)$ – строгие фотограмметрические зависимости;

5) имеется модель F_2 пересчёта земных координат точки геометрической структуры $(x, y) \in S^*$ в файловые координаты ортоизображения $(k^*, n^*) \in S^*$:

$$k^* = E\left[\frac{(x - X_o + 0.5\Delta r_x)}{\Delta r_x}\right],$$

$$n^* = E\left[\frac{(y - Y_o + 0.5\Delta r_y)}{\Delta r_y}\right],$$

$$(x, y) \in S^*;$$

б) имеется модель F_3 переноса оптической плотности (яркости) точки исходного КИ $(k, n) \in S$ соответствующей точке геометрической структуры формируемого ортоизображения $(k^*, n^*) \in S^*$:

$$F_3: d_{k,n} \rightarrow d_{k^*,n^*} \begin{cases} (k^*, n^*) \in S^*, \\ (k, n) \in S, \\ (k, n) \cong (k^*, n^*). \end{cases}$$

Требуется на основе представленных моделей и исходных данных присоединить каждому элементу геометрической структуры $(k^*, n^*) \in S^*$ формируемого ортоизображения оптическую плотность (цвет) $d \in (k, n) | (k^*, n^*) \cong (k, n)$ и тем самым сформировать ортоизображение с требуемыми характеристиками.

Ортопреобразование орбитальным методом представляет последовательность функциональных операций, приведенных на рис. 1.

Сложность вычислительных моделей, наличие в них итерационных процедур затрудняет или делает невозможным распараллеливание вычислительного процесса и перенос яркостей пикселей на основе использования возможностей графических процессоров.

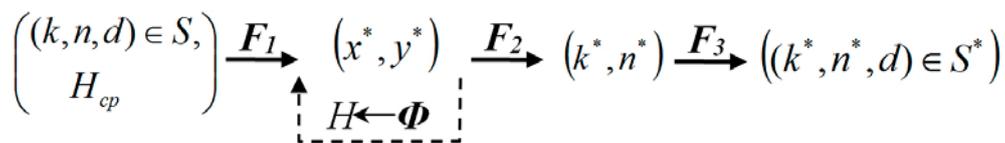


Рис.1. Последовательность функциональных операций при ортопреобразовании КИ орбитальным методом

Идея предлагаемого метода состоит в непрерывном фрагментарном формировании ортоизображения, которое заключается в следующем:

- на изображениях выделяются фрагменты (четырёхугольники) таких размеров (менее 1 км), геометрические связи между элементами которых с доста-

точной точностью описываются двухмерным полиномом первого порядка;

- соседние фрагменты имеют общие вершины по линии соприкосновения, что обеспечивает целостность формируемого ортоизображения;

- положение фрагмента (координат его вершин) определяется орбитальным

методом с учётом рельефа местности, что при малых размерах фрагментов обеспечивает учёт рельефа для всех точек фрагмента, т.е. осуществляет ортотрансформирование;

– соответствие между толерантными точками фрагментов исходного и формируемого изображения осуществляется на основе моделей, реализация которых имеет меньшую вычислительную сложность по сравнению с реализацией на основе орбитальных методов.

Предлагаемый метод содержит пять этапов.

Этап 1. Определение начальных значений углов ориентации бортовой специальной аппаратуры (БСА).

На данном этапе осуществляется определение приближённых значений углов отклонения БСА (α, β, κ) относительно конструктивной системы координат КА из множества $S_{СИ} = K_X \cup Q \cup U$, где K_X – множество параметров, характеризующих конструктивные особенности БСА КА; $Q = \{q_i\}$ – множество значений параметров, описывающих пространственное положение КА; $q_i = (X_s, Y_s, Z_s, V_x, V_y, V_z)_i$ – вектор значений координат X_s, Y_s, Z_s центра проекции БСА и скоростей V_x, V_y, V_z движения КА соответственно в осях гринвичской системы координат в момент времени, соответствующий узловой точке орбиты; $U = \{u_i\}$ – множество значений параметров, описывающих ориентацию БСА в пространстве; $u_i = (\omega, \varphi, \nu)_i$ – вектор углов, определяющих ориентацию осей координат фотоприёмной структуры БСА с соответствующими осями гринвичской системы в момент времени, соответствующий узловой точке орбиты, $i = \overline{1, K_U}$; K_U – количество узловых точек на интервале съёмки.

Определение указанных углов осуществляется на основе выражения

$$A_{\langle 3,3 \rangle}^s(t) = \left(A_{\langle 3,3 \rangle}^o(t) \right)^{-1} \cdot A_{\langle 3,3 \rangle}(U, t) \cdot \left(A_{\langle 3,3 \rangle}^k \right)^{-1}. \quad (1)$$

где – $A_{\langle 3,3 \rangle}^k$ матрица перехода от координат фотоприёмной аппаратуры к системе координат конструктивных осей КА; $A_{\langle 3,3 \rangle}^s(t)$ – матрица перехода от координат конструктивных осей КА к орбитальной системе координат; $A_{\langle 3,3 \rangle}^o(t)$ – матрица перехода от орбитальной системы координат к гринвичской системе координат; $A_{\langle 3,3 \rangle}(U, t)$ – матрица перехода от координат фотоприёмной аппаратуры к гринвичской системе координат.

Выражение (1) позволяет вычислить числовые значения элементов ${}^s a_{i,j}$ $i = \overline{1,3}, j = \overline{1,3}$ матрицы A^s .

С учётом последовательности отклонений на угол крена β , тангажа α и рыскания κ выражение элементов ${}^s a_{i,j}$, $i = \overline{1,3}, j = \overline{1,3}$ матрицы $A^s(t)$ представляется в виде

$$\begin{aligned} {}^s a_{1,1} &= \cos \alpha \cos \kappa; \\ {}^s a_{1,2} &= -\cos \alpha \sin \kappa; \\ {}^s a_{1,3} &= -\sin \alpha; \\ {}^s a_{2,1} &= -\sin \alpha \sin \beta \cos \kappa + \cos \beta \sin \kappa; \\ {}^s a_{2,2} &= \sin \alpha \sin \beta \sin \kappa + \cos \beta \cos \kappa; \\ {}^s a_{2,3} &= -\cos \alpha \sin \beta; \\ {}^s a_{3,1} &= \sin \alpha \cos \beta \cos \kappa + \sin \beta \sin \kappa; \\ {}^s a_{3,2} &= -\sin \alpha \cos \beta \sin \kappa + \sin \beta \cos \kappa; \\ {}^s a_{3,3} &= \cos \alpha \cos \beta. \end{aligned} \quad (2)$$

Далее с использованием выражения (2) и обратных тригонометрических функций определяются значения углов α, β, κ внешнего ориентирования БСА в K_U узловых точках орбиты:

$$\begin{aligned}\alpha &= \arcsin(-{}^S a_{13}), \\ \beta &= \arctg(-{}^S a_{23} / {}^S a_{33}), \\ \kappa &= \arctg(-{}^S a_{12} / {}^S a_{11}).\end{aligned}\quad (3)$$

Для определения значений этих углов на начало съёмки используются значения первых элементов из множеств Q и U .

Этап 2. Определение закона изменения значений углов α, β, κ в процессе съёмки местности.

Для определения зависимости изменения значений углов внешнего ориентирования БСА от времени на интервале съёмки $t \in [0, \Delta t]$ предлагается использовать полином второй степени:

$$\left. \begin{aligned}\alpha(t) &= c_{\alpha 0} + c_{\alpha 1} \cdot t + c_{\alpha 2} \cdot t^2, \\ \beta(t) &= c_{\beta 0} + c_{\beta 1} \cdot t + c_{\beta 2} \cdot t^2, \\ \kappa(t) &= c_{\kappa 0} + c_{\kappa 1} \cdot t + c_{\kappa 2} \cdot t^2,\end{aligned}\right\} \quad (4)$$

где $c_{\alpha 0}, c_{\alpha 1}, c_{\alpha 2}, c_{\beta 0}, c_{\beta 1}, c_{\beta 2}, c_{\kappa 0}, c_{\kappa 1}, c_{\kappa 2}$ – коэффициенты полиномов, аппроксимирующих угловое движение оси визирования БСА на интервале съёмки Δt .

Далее по рассчитанным на первом этапе значениям углов внешнего ориентирования в K_U точках орбиты, полученных через равные интервалы времени τ_U , определяются значения коэффициентов (4) с использованием следующих выражений:

– углы ориентации БСА на начало съёмки:

$$\langle c_{\alpha 0}, c_{\beta 0}, c_{\kappa 0} \rangle \equiv \theta_1, \quad (5)$$

где θ_1 – значения углов ориентации БСА, рассчитанные с использованием (3) по первым элементам из множеств Q и U ;

– угловые скорости:

$$\langle c_{\alpha 1}, c_{\beta 1}, c_{\kappa 1} \rangle = V_1 = (\theta_2 - \theta_1) / \tau_U, \quad (6)$$

где V_1 – вектор угловых скоростей углов ориентации БСА на первом интервале времени τ_U ;

– скорости изменения углов:

$$\langle c_{\alpha 2}, c_{\beta 2}, c_{\kappa 2} \rangle = W = 0.5 \cdot (V_{K_U} - V_1) / \Delta t, \quad (7)$$

где W – вектор скоростей изменения углов ориентации БСА на интервале съёмки Δt ; V_1 и V_{K_U} – угловые скорости углов ориентации БСА соответственно на первом и последнем интервалах съёмки.

Этап 3. Уточнение начальных значений указанных углов на основе координат четырех опорных точек.

Конструктивные характеристики и принципы построения бортовой специальной аппаратуры, установленной на отечественных КА «Ресурс-П» и других КА, позволяют соответствовать мировому уровню развития оптико-электронных средств ДЗЗ, а по некоторым показателям превзойти зарубежные аналоги. Однако точность навигационного обеспечения остаётся низкой (ошибка первичной координатной привязки КИ от 40 до 100 м [4]), что не обеспечивает возможность определения по снимку координат объектов местности с точностью не хуже 7–15 м без использования опорных точек. Кроме того, при оценивании условий проведения съёмки не учитываются возмущающие и другие факторы, что определяет переменность (несистематичность) ошибки первичной координатной привязки КИ [4]. Это обуславливает применение операции уточнения условий выполнения съёмки местности.

Поэтому актуальным является получение на основе использования данных, поступающих в комплексе со снимком, и минимального количества опорных точек (4–5) уточнённых параметров съёмки. Это обеспечивает высокоточное определение координат на земной поверхности орбитальным методом без использования любой другой опорной информации.

Коэффициенты $\langle c_{\kappa 0}, c_{\kappa 1}, c_{\kappa 2} \rangle$ для угла $\kappa(t)$ определяются по соответствующим элементам множества $\Theta = \{\theta_i\}$, $i = \overline{1, K_U}$ на основе (5)–(7), а первые 6 коэффициентов C_k , определяющих текущие значения углов ориентации $\alpha(t)$, $\beta(t)$, уточняются по четырём опорным точкам с использованием метода наименьших квадратов и модели F_1 отображения $(k, n)_i \rightarrow (x^*, y^*, H)_i$, $i = \overline{1, 5}$ по текущим значениям параметров съёмки. При этом матричная форма системы уравнений поправок примет следующий вид

$$\delta Q_{\langle 6,1 \rangle} = \left(B_{\langle 6,15 \rangle}^T \cdot B_{\langle 15,6 \rangle} \right)^{-1} B_{\langle 15,6 \rangle}^T \cdot F_{\langle 15,1 \rangle}, \quad (8)$$

где $\delta Q_{\langle 6,1 \rangle}$ – матрица-столбец, содержащая поправки в уточняемые коэффициенты; $B_{\langle 15,6 \rangle}, B_{\langle 6,15 \rangle}^T$ – матрицы частных производных пространственных координат опорных точек по уточняемым коэффициентам $(c_{\alpha 0}, c_{\alpha 1}, c_{\alpha 2}, c_{\beta 0}, c_{\beta 1}, c_{\beta 2}) \in C_k$, соответственно прямая и транспонированная. Расчёт элементов матриц осуществляется методом конечных разностей как отношение полученного приращения соответствующей координаты опорной точки к приращению соответствующего коэффициента;

$F_{\langle 15,1 \rangle}$ – матрица-столбец невязок координат опорных точек, которые определяются путём нахождения разницы между их рассчитанными и измеренными значениями – множество $O = \left\{ \langle k, n, x^*, y^*, H \rangle_j \right\}$, $j = \overline{1, 5}$.

Таким образом, решение (8) позволяет получить вектор уточнённых значений коэффициентов

$$(c_{\alpha 0}, c_{\alpha 1}, c_{\alpha 2}, c_{\beta 0}, c_{\beta 1}, c_{\beta 2}) \in C_k,$$

на основе которого, согласно (4), вычисляются уточнённые значения углов (α, β, κ) .

Следует отметить, что точность геометрического построения ортоизображения соответствует точности измерения опорных точек.

Этап 4. Моделирование сети опорных точек орбитальным методом.

В рамках данного этапа на КИ выделяются фрагменты (четырёхугольники) таких размеров (менее 1 км), геометрические связи между элементами которых с достаточной точностью описываются двухмерным полиномом первого порядка (рис. 2). Для каждого фрагмента орбитальными методами рассчитываются географические координаты четырёх угловых точек. Тогда при размере фрагмента $[l_k \times l_n] = [128 \times 128]$ пикселей количество вычислений на основе орбитальных методов сокращается в 4096 раз $(128 \times 128 / 4)$ по сравнению с непосредственным применением орбитального метода.

На рис. 2 контур земной поверхности, отобразившейся на исходном КИ, обозначен как $\{I_1, \dots, I_4\}$, а его положение на ортоизображении – $\{G_1, \dots, G_4\}$.

На основе орбитальной модели осуществляется установление взаимно-однозначного соответствия $(k, n) \leftrightarrow (k^*, n^*)$ между точкой $(k, n) \in S_{\phi_T}$ исходного КИ и точкой $(k^*, n^*) \in S_{\phi_T}^*$ формируемого ортоизображения. Для этого осуществляется формирование с использованием модели F_1 рабочего массива Q размерностью $6 \times K_U$ из векторов состояния КА в узловых точках орбиты, а также формирование по рассчитанным значениям $(\alpha_H, \beta_H, \kappa_H)$ и $\{c_{\alpha 1}, c_{\alpha 2}, c_{\beta 1}, c_{\beta 2}, c_{\kappa 1}, c_{\kappa 2}\}$ на основе модели F_2 элементов матрицы связи ${}^n a_i$, $i = \overline{1, 9}$, $n \in [1, N]$ в узловых точках с регулярным шагом Δt_A на временном интервале съёмки.

Как уже отмечалось, процесс установления взаимно-однозначного соответствия $(k, n) \leftrightarrow (k^*, n^*)$ для каждого элемента обрабатываемого изображения яв-

ляется ресурсоёмким. В целях сокращения времени на формирование результирующего ортоизображения указанное соответствие устанавливается для некоторой части точек исходного КИ, расположенных с некоторым шагом друг от друга. Совокупность этих точек составляет регулярную сеть опорных точек. Расстояние между точками зависит от требуемой точности построения ортоизображения, характера местности, пространственного разрешения исходного КИ. Для равнинной местности КИ с пространственным разрешением 1 м и требованиями по точности геометрического построения не хуже 15 м расстояние между соседними точками может составлять до 1 км.

Таким образом, смоделированная сеть опорных точек условно делит обрабатываемое КИ на фрагменты, а наличие

самых опорных точек позволяет использовать полиномиальные методы ФГО КИ.

Файловые координаты (k, n) вершин 1–4 (рис. 2) выбранного фрагмента с помощью модели $F_1: (k, n) \rightarrow (x^*, y^*)$ пересчитываются на основе орбитальной модели в соответствующие им координаты земной поверхности (x^*, y^*) , которые, в свою очередь, пересчитываются с помощью модели $F_2: (x^*, y^*) \rightarrow (k^*, n^*)$ в файловые координаты (k^*, n^*) вершин 1–4 соответствующего фрагмента на геометрической структуре формируемого ортоизображения. В результате будет сформировано множество пар связанных вершин фрагментов $\{(k, n, k^*, n^*)\}, i = \overline{1, 4}$, на основе которых затем вычисляется функция пересчёта точек фрагмента с исходного КИ в ортоизображение.

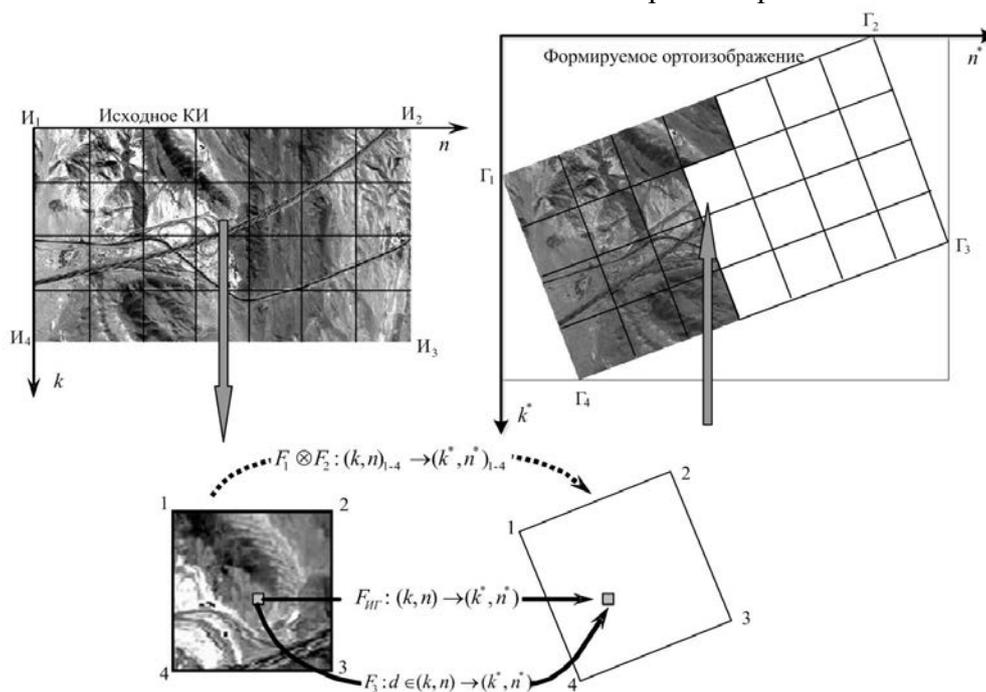


Рис. 2. Схема ортопреобразования КИ

Этап 5. Трансформирование каждого фрагмента КИ с использованием полиномиальных методов на основе полученной сети опорных точек.

На основе полученных опорных точек определяется функция $F_{III}: (k^*, n^*) \rightarrow (k, n)$ пересчёта точек фраг-

мента ортоизображения в точки исходного изображения – двухмерный полином первого порядка:

$$F_{III} : \begin{cases} k = g_1^{k^*} + g_2^{k^*} \cdot k^* + g_3^{k^*} \cdot n^* ; \\ n = g_1^{n^*} + g_2^{n^*} \cdot k^* + g_3^{n^*} \cdot n^* , \end{cases} \quad (9)$$

где значения коэффициентов $\{g_1^k, g_2^k, g_3^k, g_1^n, g_2^n, g_3^n\}$ определяются решением систем линейных уравнений, связывающих через эти коэффициенты координаты вершин фрагментов $\{(k_i, n_i, k_i^*, n_i^*)\}, i = \overline{1, 4}$ соответственно по направлению k и n .

Далее каждой точке (k^*, n^*) выбранного фрагмента с помощью функции F_{III} ставится в соответствие точка (k, n) исходного изображения и оптическая плотность этой точки $d \in (k, n)$ присваивается точке формируемого фрагмента $F_3: d \in (k, n) \rightarrow (k^*, n^*)$. Если точка (k, n) не принадлежит исходному КИ, что соответствует точкам (k^*, n^*) фрагмента при частичном его пересечении с контуром $\{\Gamma_1, \dots, \Gamma_4\}$, то этим точкам присваивается фоновый цвет.

В соответствии с рис. 2 отображение земной поверхности каждого фрагмента переносится на геометрическую структуру формируемого ортоизображения и тем самым создаётся полное ортоизображение. Соседние фрагменты имеют общие вершины по линии соприкосновения, что обеспечивает целостность формируемого ортоизображения. Положение фрагмента (координат его вершин) определяется орбитальным методом с учётом рельефа местности, что при малых размерах фраг-

ментов косвенно обеспечивает учёт рельефа для всех точек фрагмента.

Экспериментальная апробация предлагаемого метода, проведённая на 40 КИ, полученных от КА «Ресурс-П» и аналогичных КА показала, что использование метода оперативного ортотрансформирования позволило в среднем сократить более чем в четыре раза время проведения ФГО при сопоставимой точности получения результирующего изображения.

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

1. Предложен метод оперативного ортотрансформирования космических изображений, построенный на комплексировании орбитальных и полиномиальных методов обработки изображений. В основу метода положен принцип разбиения изображения на фрагменты, причём положение фрагмента определяется орбитальным методом с учётом рельефа местности, а его трансформация – полиномиальным методом, что при малых размерах фрагментов обеспечивает учёт рельефа для всех точек фрагмента.

2. Экспериментальная апробация предлагаемого метода показала, что использование метода оперативного ортотрансформирования позволило в среднем сократить в четыре раза время проведения ФГО при сопоставимой точности получения результирующего изображения.

Библиографический список

1. Современные технологии обработки данных дистанционного зондирования Земли / под ред. В.В. Еремеева. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2015. 460 с.
2. Шовенгердт Р.А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений. М.: Техносфера, 2010. 560 с.
3. Прилуцкий С.В., Руднев Н.И., Спирин А.В., Орлов С.А., Крупа А.А. Аппроксимация пространственных координат точек земной поверхности в соответствующие им координаты требуемой географической проекции при ортотрансформировании космических изображений орбитальным методом // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2014. № 2. С. 72-76.
4. Злобин В.К., Еремеев В.В. Обработка аэрокосмических изображений. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. 288 с.

Информация об авторах

Спирин Андрей Викторович, начальник отдела, Федеральное государственное унитарное предприятие «18 Центральный научно-исследовательский институт» Министерства обороны Российской Федерации. E-mail: neman51@mail.ru. Область научных интересов: методы фотограмметрической обработки аэрокосмических изображений.

Руднев Николай Иванович, ведущий инженер отдела, Федеральное государственное унитарное предприятие «18 Центральный научно-исследовательский институт» Министерства обороны Российской Федерации. Область научных интересов: методы фотограмметрической обработки аэрокосмических изображений.

Пастух Николай Кузьмич, кандидат технических наук, начальник управления, Федеральное государственное унитарное предприятие «18 Центральный научно-исследовательский институт» Министерства обороны Российской Федерации. Область научных интересов: наземная обработка материалов дистанционного зондирования Земли, тематический анализ космических изображений.

Шуклин Игорь Игоревич, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник отдела, Федеральное государственное унитарное предприятие «18 Центральный научно-исследовательский институт» Министерства обороны Российской Федерации. E-mail: Shuklin@nm.ru. Область научных интересов: синтез систем фотограмметрической обработки, методы и средства обработки материалов дистанционного зондирования Земли.

METHOD OF ORTHOTRANSFORMATION OF SPACE IMAGES IN CONDITIONS OF LACK OF CUE

© 2016 A. V. Spirin, N. I. Rudnev, N. K. Pastuh, I. I. Shuklin

Federal State Unitary Enterprise «18th Scientific Research Institute»,
Ministry of Defense of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation

The paper introduces a method of prompt orthotransformation of space images, based on the integration of the orbital and polynomial methods of photogrammetric image processing. The concept of the method consists in fragmentary formation of an orthoimage. Fragments (quadrangles) of a definite size are marked in space images, so that geometric constraints between their elements are adequately described by a bidimensional polynomial of the first order. The adjacent fragments have common vertexes on the contact line, providing integrity of the orthoimage being formed. The location of the fragment (the coordinates of its vertexes) is defined by the orbital method with consideration for the configuration of terrain, thus, if the fragment is small enough, it provides terrain correction for all the points of the fragment. To use the orbital method we define initial values of the orientation angles of the on-board equipment of the spaceship and the laws of variations of these angles in course of survey with subsequent specification of these values in terms of the coordinates of four check points. The compliance between tolerance points of fragments of the initial image and the image being formed is achieved on the basis of the models, the implementation of which is computationally less complex than that based on orbital methods. Experimental approbation of the proposed method proved that the method of prompt orthotransformation makes possible four-fold reduction of the time of photogrammetric space image processing while providing comparable accuracies of the resulting images.

Orbital method, polynomial method, Earth remote sensing, photogrammetric process, orthotransformation, space image.

Citation: Spirin A.V., Rudnev N.I., Pastuh N.K., Shuklin I.I. Method of orthotransformation of space images in conditions of lack of cue. *Vestnik of the Samara State Aerospace University*. 2016. V. 15, no. 2. P. 190-199.

DOI: 10.18287/2412-7329-2016-15-2-190-199

References

1. *Sovremennye tekhnologii obrabotki dannykh distantsionnogo zondirovaniya Zemli* [Modern technologies of processing Earth remote sensing data / ed. by V.V. Eremeev]. Moscow: PHIZMLIT Publ., 2015. 460 p.
2. Shovengerdt R.A. *Distantsionnoe zondirovanie. Modeli I metody obrabotki izobrazheniy* [Remote sensing. Models and methods of image processing]. Moscow: Technosfera Publ., 2010. 560 p.
3. Priluzkiy S.V., Rudnev N.I., Spirin A.V., Orlov S.A., Krupa A.A. Approximation of special coordinates of points on the earth's surface into corresponding coordinates of appropriate geographical projection when orthotransforming the space images by the orbital method. *Proceedings of the South-West State University. Series Control, Computer engineering, Information science. Medical instruments engineering*. 2014. No. 2. P. 72-76. (In Russ.)
4. Zlobin V.K., Eremeev V.V. *Obrabotka aerokosmicheskikh izobrazheniy* [Remote sensing data processing]. Moscow: PHIZMATLIT Publ., 2006. 288 p.

About authors

Spirin Andrey Victorovich, Head of Department, Federal State Unitary Enterprise «18th Central Scientific Research Institute», Ministry of Defense of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation. E-mail: neman51@mail.ru. Area of Research: methods of photogrammetric processing of remote sensing data.

Rudnev Nikolay Ivanovich, leading engineer, Federal State Unitary Enterprise «18th Central Scientific Research Institute», Ministry of Defense of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation. Area of Research: methods of photogrammetric processing of remote sensing data.

Pastuh Nikolay Kuzmich, Candidate of Science (Engineering), Head of Department, Federal State Unitary Enterprise «18th Central Scientific Research Institute», Ministry of Defense of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation. Area of Research: ground processing of materials of Earth remote sensing; thematic analysis of space images.

Shuklin Igor Igorevich, Candidate of Science (Engineering), leading researcher, Federal State Unitary Enterprise «18th Central Scientific Research Institute», Ministry of Defense of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation. E-mail: Shuklin@nm.ru. Area of Research: synthesis of systems of photogrammetric processing, methods and means of processing the materials of Earth remote sensing.