Методика априорной оценки точности геометрического совмещения разновременных спектрозональных изображений земной поверхности

А.Е. Кузнецов, П.Н. Светелкин, В.И. Пошехонов

Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина Рязань, 390005, Россия E-mail: foton@rsreu.ru

Рассматривается методика априорной оценки точности геометрического совмещения спектрозональных изображений земной поверхности, которые формируются датчиками высокого пространственного разрешения. Приводится модель геокодирования видеоданных, используемая для получения геометрического соответствия между снимками. Исследуются источники, приводящие к возникновению геометрических рассогласований снимков. Показано, что причиной геометрических рассогласований при получении цветосинтезированного изображения являются различные моменты съёмки одноимённых объектов земной поверхности. Такая съёмка приводит к рассогласованиям между спектрозональными снимками, вызванными ошибками измерения угловых скоростей космического аппарата и неточностями задания высот в цифровых моделях рельефа, используемых при обработке снимков. Ошибки измерения угловых скоростей устраняются на этапе межканального геодезического ориентирования, а ошибки измерения высот — выбором цифровой модели рельефа необходимой точности. Приводятся математические соотношения для оценки величины этих рассогласований, а также априорные оценки точности совмещения спектрозональных снимков для пар изображений от космических аппаратов «Ресурс-П» и «Канопус-В». Рассматриваются результаты практической апробации методики для аппаратуры «Геотон» спутников «Ресурс-П». По результатам расчётов даются рекомендации по проектированию программных средств наземной обработки, позволяющих скомпенсировать влияние искажающих факторов и обеспечить высокоточное совмещение снимков между собой.

Ключевые слова: съёмочная аппаратура высокого разрешения, разновременные спектрозональные изображения, координатные рассогласования снимков, точность координатного совмещения

> Одобрена к печати: 05.11.2020 DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-7-19-25

Введение

В современных системах дистанционного зондирования Земли высокого пространственного разрешения типа «Канопус-В», «Ресурс-П» и др. аппаратура наблюдения спроектирована по принципу разделения отражённого от земной поверхности энергетического потока по пространственно разнесённым фоточувствительным элементам, или так называемым оптико-электронным преобразователям (ОЭП). Например, в аппаратуре МСС (мультиспектральная камера) спутника «Канопус-В» используется четыре ОЭП, каждый из которых включает одну кадровую матрицу. Матрицы расположены на плоскости последовательно друг за другом и обеспечивают формирование изображений в спектральных диапазонах 0,4-0,52; 0,51-0,60; 0,63-0,69; 0,75-0,84 мкм (*рис. 1a*, см. с. 20) (Макриденко и др., 2017). В результате съёмка одних и тех же объектов земной поверхности выполняется с разницей по времени, при разном положении спутника и под разными углами. Поэтому получаемые спектрозональные изображения имеют взаимные геометрические искажения, которые не могут быть скомпенсированы простым плоскопараллельным смещением.

В аппаратуре «Геотон» спутников серии «Ресурс-П» для формирования спектрозональных и панхроматических изображений используется три ОЭП, сдвинутых друг относительно друга на 90 мм (*puc. 16*). Здесь так же формируются три группы изображений, геометрически искажённых друг относительно друга (Архипов и др., 2014).



Рис. 1. Схема расположения ОЭП в аппаратуре МСС (а) и «Геотон» (б)

Координатное совмещение разновременных изображений выполняется в ходе наземной обработки на основе математических моделей геокодирования видеоданных при известной высоте местности *h*. Особенность этой операции состоит в том, что из-за ошибок определения элементов внешнего ориентирования и высоты местности, входящих в модель обработки, геометрическое совмещение снимков между собой выполняется с некоторой погрешностью. Поэтому весьма важно на этапах проектирования съёмочной аппаратуры и создания средств обработки оценить возможность получения качественных цветосинтезированных и паншарпенинговых изображений земной поверхности. Для получения такой оценки и рекомендаций по проектированию средств обработки предлагается рассматриваемая ниже методика.

Модель оценки взаимных искажений разновременных снимков

Исходными данными для геометрического совмещения спектрозональных изображений служат строгие модели геокодирования видеоданных, которые в общем виде представляются функциями прямого координатного соответствия: $\phi = \Phi_{\gamma}(m_{\gamma}, n_{\gamma}, h, \mathbf{u}_{\gamma}), \quad \lambda = F_{\gamma}(m_{\gamma}, n_{\gamma}, h, \mathbf{u}_{\gamma}), \quad m_{\gamma} = \overline{1, M_{\gamma}}, \quad n_{\gamma} = \overline{1, N_{\gamma}} - u$ обратного координатного соответствия: $m_{\gamma} = \Phi_{\gamma}^{-1}(\phi, \lambda, h, \mathbf{u}_{\gamma}), \quad n_{\gamma} = F_{\gamma}^{-1}(\phi, \lambda, h, \mathbf{u}_{\gamma}), \quad rae (\phi, \lambda), \quad (m_{\gamma}, n_{\gamma}) - reodesuveckue и планарные координаты пикселя спектрозонального изображения с номером <math>\gamma$ (для аппаратуры «Геотон» значение γ соответствует каналам В (синий), G (зелёный), Р (панхроматический)); \mathbf{u}_{γ} — вектор входных параметров модели, описывающих элементы внешнего и внутреннего ориентирования каждого ОЭП (Ахметов и др., 2020). На их основе геометрическое соответствие между панхроматическим ОЭП (ОЭП_р) и спектрозональными (ОЭП_в, ОЭП_G) можно представить в следующем виде:

$$m_{\mathrm{P}} = \Phi_{\mathrm{P}}^{-1} \Big[\Phi_{\gamma}(m_{\gamma}, n_{\gamma}, h, \mathbf{u}_{\gamma}), F_{\gamma}(m_{\gamma}, n_{\gamma}, h, \mathbf{u}_{\gamma}), h, \mathbf{u}_{\mathrm{P}} \Big], n_{\mathrm{P}} = F_{\mathrm{P}}^{-1} \Big[\Phi_{\gamma}(m_{\gamma}, n_{\gamma}, h, \mathbf{u}_{\gamma}), F_{\gamma}(m_{\gamma}, n_{\gamma}, h, \mathbf{u}_{\gamma}), h, \mathbf{u}_{\mathrm{P}} \Big], \quad \gamma \in \{B, G\}.$$

$$(1)$$

Поскольку ОЭП съёмочной аппаратуры в фокальной плоскости сдвинуты друг относительно друга, то одноимённые объекты земной поверхности наблюдаются в различные моменты времени. За это время космический аппарат (КА) изменяет своё пространственное и угловое положение на орбите. Эти параметры входят в векторы \mathbf{u}_{γ} и определяются измерительными системами спутника с некоторой погрешностью, что приводит к несовпадению координат одноимённых точек на совмещаемых между собой изображениях.

Другим источником погрешностей геометрического совмещения снимков являются ошибки задания высоты объектов местности h в используемой для обработки цифровой модели рельефа (ЦМР). Ошибки задания высоты местности ($\sigma_{\text{ЦМР}}$) приводят к ошибочному измерению координат высотных объектов, наблюдаемых на снимках и, соответственно, к их недостоверному совмещению.

Рассмотрим последовательно влияние перечисленных источников ошибок на точность совмещения изображений.

Будем считать, что модели обработки видеоданных (1) откалиброваны, элементы внешнего ориентирования известны с высокой точностью на начальный момент времени съёмки объекта, например первым ОЭП. Тогда при съёмке объекта вторым ОЭП угловое положение камеры изменится на некоторую величину, определённую измерителем угловых скоростей КА. Ошибку совмещения снимков σ_{yrn} в пикселях, обусловленную ошибкой измерения угловой скорости КА по тангажу σ_{α} и крену σ_{ω} , можно оценить как

$$\sigma_{\rm yrn} = \frac{\Theta f}{r_{\rm \phi} \upsilon_6} \varepsilon_{\rm v}, \quad \upsilon_6 = \frac{\upsilon_{\rm KA} f R_3}{H(R_3 + H)}, \quad \upsilon_{\rm KA} = \sqrt{\frac{GM}{R_3 + H}}, \quad \sigma_{\rm yrn} = \sigma_{\omega} = \sigma_{\alpha}, \tag{2}$$

где ε_{v} — ошибка определения скорости изменения угла тангажа или крена КА; Θ — расстояние между ОЭП в фокальной плоскости камеры; f — фокусное расстояние камеры; r_{ϕ} — размер фотоэлемента; v_{6} — скорость «бега» изображения в фокальной плоскости камеры; v_{KA} — скорость движения КА по орбите с высотой H; R_{3} — радиус Земли, R_{3} = 6 378 245 м; G — гравитационная постоянная, $G = 6,67259 \cdot 10^{-11} \text{ м}^{3} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{с}^{-2}$; M — масса Земли, $M = 5,97 \cdot 10^{24} \text{ кг}$.

Как уже было замечено, из-за размещения ОЭП в фокальной плоскости высотные объекты местности наблюдаются под разными углами. В результате вершина объекта на снимке смещается относительно подстилающей поверхности в кадровом направлении на величину $\Delta \ell$:

$$\Delta \ell = \frac{h\Theta(R_3 + H)}{fR_3}.$$
(3)

При совмещении величина рассогласований измеряется в пикселях, поэтому для пересчёта значений используется проекция пикселя R на подстилающую поверхность при съёмке в надир:

$$R = \frac{r_{\phi}H}{f}.$$
(4)

Для аппаратуры «Геотон» КА «Ресурс-П» значение *R* составляет 2,1 м в каналах R, G и B, а для аппаратуры MCC КА «Канопус-В» — 10,5 м для каналов R, G, B и Ir (инфракрасный). Тогда с учётом выражения (4) формула (3) примет вид:

$$\Delta \ell_{\pi} = \frac{h\Theta(R_3 + H)}{r_{\phi} H R_3}.$$
(5)

Например, для аппаратуры «Геотон» КА «Ресурс-П» при $\Theta = 90 \cdot 10^{-3}$ м (Архипов и др., 2014), f = 4 м, H = 475 км рассогласование $\Delta \ell_{\pi} = 0,3$ пикселя спектрозонального канала между панхроматическим и спектрозональным ОЭП будет проявляться при перепаде высот h = 26,4 м. Подобные смещения компенсируются в модели обработки (1) значениями высоты h, считываемыми из ЦМР. Поэтому ошибки совмещения будут зависеть от точности представления высот на ЦМР ($\sigma_{\text{ПМР}}$):

$$\sigma_h = \frac{\Theta}{r_{\rm th} H} \sigma_{\rm IIMP},\tag{6}$$

где σ_h — ошибка совмещения снимков в пикселях, обусловленная погрешностью высот в ЦМР.

Суммарная ошибка совмещения снимков в кадровом направлении $\sigma_{_{\! K}}$ будет равна:

$$\sigma_{\kappa} = \sqrt{\sigma_{\alpha}^2 + \sigma_h^2}.$$
(7)

Соответственно, общая ошибка о геометрического совмещения в пикселях вычисляется по формуле:

$$\sigma = \sqrt{\sigma_{\kappa}^2 + \sigma_{\omega}^2} = \sqrt{2\sigma_{\gamma\gamma\pi}^2 + \sigma_h^2}.$$
(8)

Таким образом, соотношения (2), (6)–(8) составляют основу методики априорной оценки точности геометрического совмещения спектрозональных изображений, формируемых съёмочной камерой.

Результаты экспериментальной апробации методики

Качество геометрического совмещения изображений, в том числе панхроматических и спектрозональных, можно оценить численно по рассогласованию координат одноимённых объектов. При этом допустимая величина координатного рассогласования должна быть такой, чтобы на цветосинтезированном изображении не было видно цветовых «муаров». Это достигается при среднеквадратическом отклонении (СКО) координатных рассогласований не более 0,3 пикселя, т.е. при $\sigma \le 0,3$ пикселя изображения совмещаются без визуально заметных рассогласований и никаких дополнительных обработок цветосинтезированного снимка не требуется. При формировании паншарпенингового изображения точность совмещения на уровне 0,3 пикселя относится к спектрозональному снимку (Ахметов и др., 2020). Пример, иллюстрирующий корректность предложенного критерия, поясняет *рис. 2.*



Рис. 2. Примеры разноточного совмещения спектрозональных изображений: a — координатные рассогласования отсутствуют; δ — СКО координатного рассогласования не более 0,3 пикселя (цветовые «муары» не наблюдаются); s — СКО координатных рассогласований равно 0,5 пикселя (цветовые «муары» на границах объектов заметны)

С учётом предложенного критерия оценим точность совмещения данных, получаемых аппаратурой «Геотон» КА «Ресурс-П». При этом будем считать, что в модели обработки используется ЦМР SRTM с разрешением в плане 3", для которой $\sigma_{\text{ЦМР}} = 9$ м (Rodriguez et al., 2005). Оценку координатного рассогласования выполним для изображений от панхроматического и спектрозонального ОЭП, а также для снимков от двух спектрозональных ОЭП с минимальным и максимальным расстоянием между ними.

Оценки ошибок совмещения снимков спектрозональных изображений в пикселях с размером проекции пикселя 2,1 м, вызванные неточными значениями высоты рельефа и углового положения камеры $\varepsilon_{\upsilon\alpha} = \varepsilon_{\upsilon\omega} = 3,49 \cdot 10^{-6}$ рад/с, представлены в *таблице*. Для аппаратуры КА «Канопус-В» расчёты аналогичны и также представлены в *таблице* для $\varepsilon_{\upsilon\alpha} = \varepsilon_{\upsilon\omega} = 2,42 \cdot 10^{-5}$ рад/с при размерах проекции пикселя R = 10,5 м.

σ_{угл}, пиксель Совмещаемые изображения σ_h , пиксель σ, пиксель $O \Im \Pi_{P} - O \Im \Pi_{R}$ «Pecypc-П» 0,28 1,17 1,66 $\begin{array}{c} O \Im \Pi_{B}^{r} - O \Im \Pi_{G}^{B} \\ O \Im \Pi_{G}^{r} - O \Im \Pi_{R}^{B} \end{array}$ 0,19 2,34 3,31 0,003 0,04 0,06 «Канопус-В» $O \Im \Pi_{\rm P} - O \Im \Pi_{\rm B}$ 0.05 4.89 6.92 $\begin{array}{c} O \Im \Pi_{B}^{P} - O \Im \Pi_{G}^{B} \\ O \Im \Pi_{B}^{P} - O \Im \Pi_{Ir}^{B} \end{array}$ 0,03 3,26 4,61 0,10 9,78 13,83

Априорные оценки точности совмещения спектрозональных изображений



Рис. 3. Графики межканальных рассогласований в одноимённых точках изображений маршрута съёмки, содержащего 38 000 строк, полученных аппаратурой «Геотон» КА «Ресурс-П»: *a* — до ориентирования; *б* — после ориентирования

Из *таблицы* следуют следующие важные выводы. Во-первых, используемая при обработке ЦМР SRTM с разрешением в плане 3" удовлетворительна по точностным характеристикам для субпиксельного совмещения спектрозональных изображений, для которых высотные перепады наблюдаемых объектов не превосходят 27 м. При выборе ЦМР необходимо учитывать адекватность описания моделью рельефа реальных перепадов высоты на местности. Так, для равнинных территорий будет достаточно использовать ЦМР SRTM с разрешением 30', а для холмистой местности — SRTM с разрешением 3". В горных районах, как показывает практика, ЦМР SRTM с разрешением 3" не всегда обеспечивает точность совмещения разнозональных снимков менее 0,3 пикселя.

Во-вторых, неточные знания об угловой скорости камеры приводят к значительным ошибкам совмещения разнозональных изображений. Поэтому для высокоточного геометрического совмещения снимков в наземных комплексах обработки должна использоваться процедура межканального геодезического ориентирования. Суть процедуры состоит в следующем. На совмещаемых изображениях идентифицируются одноимённые точки. На основе их координат рассчитываются поправки к угловым элементам внешнего ориентирования камеры — $\Delta \mathbf{u}_{,}$ — таким образом, чтобы рассогласования в одноимённых точках не превосходили заданного порогового значения. Эту процедуру иллюстрирует рис. 3 (см. с. 23), на котором приведены межканальные рассогласования в пикселях в одноимённых точках, идентифицированных на снимках от ОЭП_Р и ОЭП_В маршрута 0041_0102_01100_1_01055_04_00 от КА «Ресурс-П» № 1 до и после выполнения процедуры межканального геодезического ориентирования. СКО координатных рассогласований в целом по маршруту съёмки составило 0,65 пикселя, а в отдельных частях снимка достигает 1,4 пикселя. Подобный разброс невязок в одноимённых точках объясняется особенностями углового движения спутника. При этом апостериорные оценки максимального координатного рассогласования одноимённых точек хорошо согласуются с расчётными значениями, представленными в таблице. После проведения процедуры ориентирования СКО невязок координат одноимённых точек составило 0,24 пикселя (см. рис. 36), что позволило получить качественное паншарпенинговое изображение земной поверхности.

Практическое исследование координатных рассогласований между снимками, полученными в каналах В и Ir аппаратурой МСС КА «Канопус-В», показали, что СКО координатных рассогласований может достигать 11 пикселей, что также соответствует априорным оценкам, приведённым в *таблице*.

Заключение

Рассмотренная в статье методика, несмотря на свою простоту, достаточно точно описывает условия высокоточного совмещения спектрозональных изображений при формировании выходных информационных продуктов стандартных уровней обработки. По полученным с её помощью оценкам в программных комплексах обработки данных от КА «Канопус-В» № 1–6 и «Ресурс-П» № 1–3 были предусмотрены средства межканального геодезического ориентирования, что позволило получать паншарпенинговые и цветосинтезированные изображения земной поверхности с точностью геометрического совмещения 0,3 пикселя. Применение данной методики к информации от аппаратуры КМСС КА «Метеор-М» № 2 позволило установить, что высокоточное геометрическое совмещение снимков между собой можно выполнить без операции межканального геодезического ориентирования.

Методика была использована и при оценке точности совмещения спектрозональных изображений, которые будут поступать с проектируемого российско-белорусского КА. На основе полученных оценок установлено, что для заявленных разработчиками КА точностных характеристик измерительных систем спутника операция межканального геодезического ориентирования может не потребоваться. Это, в свою очередь, позволяет повысить надёжность и производительность создаваемого наземного комплекса обработки целевой информации.

Литература

2. Ахметов Р.Н., Зинина И.И., Юдаков А.А., Еремеев В.В., Кузнецов А.Е., Пошехонов В.И., Пресняков О.А., Светелкин П. Н. Точностные характеристики выходной продукции высокого разрешения

^{1.} *Архипов С.А., Бакланов А. И., Герасименко В. В.* Многоспектральная оптико-электронная аппаратура «Геотон» космического аппарата «Ресурс-П» // Исслед. Земли из космоса. 2014. № 2. С. 44–54.

КА «Ресурс-П» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 3. 2020. С. 41–47.

- 3. *Макриденко Л.А., Волков С. Н., Горбунов А.В., Салихов Р.С., Ходненко В. П.* КА «Канопус-В» № 1 первый российский малый космический аппарат высокодетального дистанционного зондирования Земли нового поколения // Вопросы электромеханики. Тр. ВНИИЭМ. Т. 156. 2017. С. 10–20.
- 4. *Rodriguez E., Morris C. S., Belz J. E., Chapin E. C., Martin J. M., Daffer W., Hensley S.* An assessment of the SRTM topographic products. Technical Report JPL D-31639. 2005. 145 p.

A priori accuracy assessment methodology of the geometric alignment of multi-temporal multispectral images of the Earth's surface

A. E. Kuznetsov, P. N. Svetelkin, V. I. Poshekhonov

Utkin Ryazan State Radio Engineering University, Ryazan 390005, Russia E-mail: foton@rsreu.ru

A methodology for a priori accuracy assessment of the geometric alignment of multispectral images of the Earth's surface, which are formed by high spatial resolution sensors, is considered. An image geolocation model that is used to obtain geometric match between images is presented. Sources that lead to geometric mismatches of images are investigated. It is shown that the cause of geometric mismatches when obtaining a color-synthesized image is different moments of image acquisition of the objects on the Earth's surface. This leads to discrepancies between multispectral images caused by errors in measuring the spacecraft's angular velocities and inaccuracies in digital elevation models used in image bundle adjustment, and errors in measuring heights — by choosing a digital elevation model of the required accuracy. Mathematical relations to estimate the magnitude of these mismatches are given, as well as a priori estimates of the alignment accuracy of multispectral images for pairs of images from the Resurs-P and Kanopus-V spacecrafts. The results of practical testing of the methodology for the Geoton equipment of Resurs-P satellites are considered. Based on the results of calculations, recommendations are given for the design of ground processing software which make it possible to compensate for the influence of distorting factors and ensure high-precision alignment of images with each other.

Keywords: high-resolution imaging equipment, multi-temporal multispectral images, coordinate misalignment of images, accuracy of geometric alignment

Accepted: 05.11.2020 DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-7-19-25

References

- 1. Arkhipov S.A., Baklanov A.I., Gerasimenko V.V., Mnogospektral'naya optiko-elektronnaya apparatura "Geoton" kosmicheskogo apparata "Resurs-P" (Multispectral optical-electronic equipment "Geoton" of the spacecraft "Resource-P"), *Issledovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, No. 2, pp. 44–54.
- Akhmetov R. N., Zinina I. I., Yudakov A. A., Eremeev V. V., Kuznetsov A. E., Poshekhonov V. I., Presnyakov O. A., Svetelkin P. N., Tochnostnye kharakteristiki vykhodnoi produktsii vysokogo razresheniya KA "Resurs-P" (Precision characteristics of high resolution output products from Resurs-P spacecraft), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17, No. 3, pp. 41–47.
- Makridenko L.A., Volkov S.N., Gorbunov A.V., Salikhov R.S., Khodnenko V.P., KA "Kanopus-V" No. 1 – pervyi rossiiskii malyi kosmicheskii apparat vysokodetal'nogo distantsionnogo zondirovaniya Zemli novogo pokoleniya (The first Russian next generation high resolution Earth remote sensing small satellite Canopus-V No. 1), *Voprosy elektromekhaniki. Trudy VNIIEM*, Vol. 156, 2017, pp. 10–20.
- 4. Rodriguez E., Morris C. S., Belz J. E., Chapin E. C., Martin J. M., Daffer W., Hensley S., *An assessment of the SRTM topographic products*, Technical Report JPL D-31639, 2005, 145 p.