

КОСМИЧЕСКАЯ СЪЕМКА, АЭРОФОТОСЪЕМКА И ФОТОГРАММЕТРИЯ

УДК 528.8

DOI: 10.30533/0536-101X-2019-63-3-282-291

Развитие методов ориентирования космических сканерных снимков

© 2019 г. А.Л. Аксенов, О.И. Козлов*

Научно-исследовательский институт точных приборов, Москва, Россия

*olegkozlov80@yandex.ru

The development of geo-bridging methods of the scanner push-broom images

A.L. Aksenov, O.I. Kozlov*

Research Institute of Precision Instruments, Moscow, Russia

*olegkozlov80@yandex.ru

Received January 21, 2019

Revised May 15, 2019

Accepted June 6, 2019

Keywords: affine amendments, geo-bridging, linear objects, polynomial amendments, RPC, scanner push-broom images, System shift, track segments.

Summary. Description of the optimum components of the high-raised basis for the clarification of the RPC-model of high-resolution scanner push-broom images is given. For the scanner push-broom images geo-bridging it is offered to use the geodetic reference points (linear objects, road guard lines, fences, coastlines etc.) and geodetic navigation track segments, received in the dynamic and kinematic mode. Three types of amendments (system shift, affine amendments and polynomial amendments) for the RPC model refinement of the foreign and domestic high-resolution scanner bush-broom images are also offered. Recommendations for each type of amendments and corresponding type of push-broom images are given. Description of analytical solution of the task is given. Advantages of the joint use of the geodetic reference points, linear object segments or navigation tracks segments for the purpose of geo-bridging of the scanner push-broom images are described. Comparative characteristics of the geo-bridging method of the domestic Resource-P images and foreign WorldView-2 images are given. Description of various combinations of reference points and linear object segments at their minimum admissible quantity for calculation of affine amendments to RPC are given. The technology of creation of orthophotomap in the Photomod program complex is presented. The article contains practical experiments on the geo-bridging of the foreign and domestic high-resolution scanner bush-broom images.

Citation: Aksenov A.L., Kozlov O.I. The development of geo-bridging methods of the scanner push-broom images. *Izvestiya vuzov «Geodeziya i aerofotosyemka»*. Izvestia vuzov «Geodesy and Aerophotosurveying». 2019, 63 (3): 282–291. [In Russian] DOI: 10.30533/0536-101X-2019-63-3-282-291.

Поступила 21 января 2019 г.

После доработки 15 мая 2019 г.

Принята к печати 6 июня 2019 г.

Ключевые слова: аффинные и полиномиальные поправки, геодезическая привязка, линейные объекты, системный сдвиг, треки, RPC.

Дано описание оптимального состава планово-высотной основы для уточнения модели RPC космических сканерных снимков высокого разрешения. Для этих целей предлагается использовать опорные точки местности, линейные объекты (ограждения дорог, заборы и т.п.), треки, полученные с помощью геодезической аппаратуры в динамическом режиме.

Для цитирования: Аксенов А.Л., Козлов О.И. Развитие методов ориентирования космических сканерных снимков // Изв. вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2019. Т. 63. № 3. С. 282–291. DOI: 10.30533/0536-101X-2019-63-3-282-291.

Введение

Хорошо известен метод уточнения модели RPC сканерных снимков с использованием опорных точек местности (ОТМ) [1, 2]. В качестве ОТМ применяются различимые на снимках контурные точки. На космических снимках с разрешением 0,5–2,0 м такими точками могут быть углы заборов, бетонные блоки, углы невысоких (2–4 м) строений, основания скульптурных сооружений, колодцы и т.д. На некоторых снимках число таких точек может быть недостаточным. При этом измерения углов высоких заборов или углов строений даже небольшой высоты может вызывать трудности в случае больших углов наклона снимков. В этом случае в качестве опорных данных можно использовать отрезки линейных объектов — заборы, ограждения дорог, береговые линии рек и т.д. [1]. Измерить точку на отображении такого объекта на снимке можно точнее, чем, например, угол забора при больших наклонах снимка. Однако в этом случае трудозатраты увеличиваются, так как на местности необходимо будет измерить две граничные точки линейного объекта. Дополнительно при использовании в качестве линейного объекта ограждений дорог или береговых линий рек необходимо составить детальный абрис окружающей местности для идентификации отрезка линейного объекта на снимке [3]. Для уменьшения трудозатрат, связанных с выполнением геодезических измерений, в качестве планово-высотной основы можно применять отрезки треков, записанные геодезическим спутниковым оборудованием во время движения автомобиля [4]. Это позволяет оптимизировать решение задачи ориентирования космических сканерных снимков высокого разрешения, используя в качестве планово-высотной основы сочетание опорных точек, отрезков линейных объектов и геодезических треков, которое будет определяться информативностью снимка, требуемой точностью геодезической привязки и временными ограничениями на выполнение работ по подготовке планово-высотной основы.

Постановка задачи

Задача ориентирования космических сканерных снимков высокого разрешения, поставляемых с RPC-полиномами, заключается в уточнении модели RPC при помощи поправок. Модель RPC задается соотношениями вида

$$s = P_s(B, L, H) = \frac{P_s^1(B, L, H)}{P_s^2(B, L, H)},$$

$$l = P_l(B, L, H) = \frac{P_l^1(B, L, H)}{P_l^2(B, L, H)},$$

где s — координата точки сканерного изображения по строке; l — координата точки сканерного изображения по столбцу; $P_s^1, P_s^2, P_l^1, P_l^2$ — полиномы третьей степени; B, L, H — геодезические координаты и высоты точек местности [3].

В зависимости от типа снимка (WorldView, GeoEye, SPOT, Pleiades, Ресурс-П и т.п.) и точности используемых опорных данных применяют линейные поправки (сдвиг), аффинные поправки или полиномиальные поправки (полиномы второй степени).

Линейные поправки (сдвиг):

$$F_s = s = P_s(B, L, H) + a_0;$$

$$F_l = l = P_l(B, L, H) + b_0. \quad (1)$$

Аффинные поправки:

$$F_s = s = P_s(B, L, H) + a_0 + a_1 P_s + a_2 P_l;$$

$$F_l = l = P_l(B, L, H) + b_0 + b_1 P_s + b_2 P_l. \quad (2)$$

Полиномиальные поправки (полиномы второй степени):

$$F_s = s = P_s(B, L, H) + a_0 + a_1 P_s + a_2 P_l +$$

$$+ a_3 P_s P_l + a_4 P_s P_s + a_5 P_l P_l;$$

$$F_l = l = P_l(B, L, H) + b_0 + b_1 P_s + b_2 P_l +$$

$$+ b_3 P_s P_l + b_4 P_s P_s + b_5 P_l P_l. \quad (3)$$

Для определения коэффициентов a_i, b_i можно использовать опорные точки [2, 5], отрезки линейных объектов [3] и геодезических треков [4] или сочетание опорных точек и отрезков.

Аналитическое решение задачи

Составим системы уравнений для определения поправок к RPC с использованием опорных точек и линейных отрезков. Уравнениями для определения коэффициентов поправок a_i, b_i являются уравнения (1)–(3). Для составления уравнений необходимо измерить пиксельные координаты ОТМ на снимке $s_{изм}, l_{изм}$ и вычислить значения RPC-полиномов: $s_{изм} = P_s(B, L, H); l_{изм} = P_l(B, L, H)$.

Для отрезков линейных объектов или треков воспользуемся тем, что для любой точки отрезка небольшой протяженности можно записать:

$$B = B_1 + t(B_2 - B_1); L = L_1 + t(L_2 - L_1); H = H_1 + t(H_2 - H_1); 0 < t < 1, \tag{4}$$

где (B_1, L_1, H_1) и (B_2, L_2, H_2) — геодезические координаты концов отрезка трека.

Если измерить координаты произвольной точки образа отрезка на снимке и подставить координаты точки (4) в формулы (1)–(3), то получим уравнения для определения коэффициентов поправок a_i, b_i и параметра t , определяющего положения точки на отрезке. После линеаризации уравнений для отрезков и опорных точек получим систему уравнений поправок для модели $Ax + v = B$.

Для модели (1):

$$A = \begin{bmatrix} \partial F_s / \partial a_0 & \partial F_s / \partial b_0 & \partial F_s / \partial t_1 & \partial F_s / \partial t_2 & \dots & \partial F_s / \partial t_n \\ \partial F_l / \partial a_0 & \partial F_l / \partial b_0 & \partial F_l / \partial t_1 & \partial F_l / \partial t_2 & \dots & \partial F_l / \partial t_n \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \partial F_s / \partial a_0 & \partial F_s / \partial b_0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \partial F_l / \partial a_0 & \partial F_l / \partial b_0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix}$$

Для модели (2):

$$A = \begin{bmatrix} \partial F_s / \partial a_0 & \partial F_s / \partial a_1 & \partial F_s / \partial a_2 & \partial F_s / \partial b_0 & \partial F_s / \partial b_1 & \partial F_s / \partial b_2 & \partial F_s / \partial t_1 & \partial F_s / \partial t_2 & \dots & \partial F_s / \partial t_n \\ \partial F_l / \partial a_0 & \partial F_l / \partial a_1 & \partial F_l / \partial a_2 & \partial F_l / \partial b_0 & \partial F_l / \partial b_1 & \partial F_l / \partial b_2 & \partial F_l / \partial t_1 & \partial F_l / \partial t_2 & \dots & \partial F_l / \partial t_n \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \partial F_s / \partial a_0 & \partial F_s / \partial a_1 & \partial F_s / \partial a_2 & \partial F_s / \partial b_0 & \partial F_s / \partial b_1 & \partial F_s / \partial b_2 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \partial F_l / \partial a_0 & \partial F_l / \partial a_1 & \partial F_l / \partial a_2 & \partial F_l / \partial b_0 & \partial F_l / \partial b_1 & \partial F_l / \partial b_2 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix}$$

Для модели (3):

$$A = \begin{bmatrix} \partial F_s / \partial a_0 & \partial F_s / \partial a_1 & \partial F_s / \partial a_2 & \dots & \partial F_s / \partial a_5 & \partial F_s / \partial b_0 & \partial F_s / \partial b_1 & \partial F_s / \partial b_2 & \dots & \partial F_s / \partial b_5 & \partial F_s / \partial t_1 & \partial F_s / \partial t_2 & \dots & \partial F_s / \partial t_n \\ \partial F_l / \partial a_0 & \partial F_l / \partial a_1 & \partial F_l / \partial a_2 & \dots & \partial F_l / \partial a_5 & \partial F_l / \partial b_0 & \partial F_l / \partial b_1 & \partial F_l / \partial b_2 & \dots & \partial F_l / \partial b_5 & \partial F_l / \partial t_1 & \partial F_l / \partial t_2 & \dots & \partial F_l / \partial t_n \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \partial F_s / \partial a_0 & \partial F_s / \partial a_1 & \partial F_s / \partial a_2 & \dots & \partial F_s / \partial a_5 & \partial F_s / \partial b_0 & \partial F_s / \partial b_1 & \partial F_s / \partial b_2 & \dots & \partial F_s / \partial b_5 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \partial F_l / \partial a_0 & \partial F_l / \partial a_1 & \partial F_l / \partial a_2 & \dots & \partial F_l / \partial a_5 & \partial F_l / \partial b_0 & \partial F_l / \partial b_1 & \partial F_l / \partial b_2 & \dots & \partial F_l / \partial b_5 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix}$$

В верхней части матрицы A даны частные производные функций F_s и F_l при использовании для геодезической привязки отрезков линейных объектов; в нижней части матрицы A — частные производные функций F_s и F_l при использовании для геодезической привязки опорных точек местности. Решение выполняется методом последовательных приближений по способу

наименьших квадратов. Решением будут коэффициенты a_j, b_j поправок (системный сдвиг, аффинные и полиномиальные поправки) к RPC-полиномам и параметр t_j ($j=1, \dots, n$, n — число отрезков), определяющий положение точки на отрезке.

По формулам (4) можно вычислить геодезические координаты всех измеренных на снимках точек отрезков линейных объектов. Из измерений на снимке координат точек отрезков, координат опорных точек, а также геодезических координат вычисленных точек отрезков и известных геодезических координат опорных точек можно создать файл RAT-B для загрузки в проект программного обеспечения стороннего разработчика (например, Photomod). В программном комплексе (ПК) Photomod применяют только аффинные поправки и поправки типа «сдвиг». Уточнив параметры модели, можно выполнить дальнейшую обработку снимка в этом комплексе. Можно также использовать непосредственно вычисленные в программе коэффициенты a_j, b_j для определения поправок к RPC для создания ортофотопланов в собственном программном обеспечении.

Для вычисления поправок типа «сдвиг» необходима хотя бы одна опорная точка [1, 5] или не менее двух отрезков линейных объектов. Для вычисления аффинных поправок необходимо не менее четырех ОТМ или не менее семи разнонаправленных отрезков линейных объектов или треков.

Возможны различные сочетания числа отрезков и ОТМ. Для определения поправок типа «сдвиг» достаточно одной опорной точки или двух отрезков линейных объектов. Для корректных вычислений аффинных поправок число уравнений должно быть

$$2(K_{\text{отр}} + K_{\text{от}}) > \text{число неизвестных } (6 + K_{\text{отр}}),$$

где 6 — число аффинных поправок $a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3$; $K_{\text{отр}}$ — число отрезков и параметров t_j , определяющих положение точки на отрезке; $K_{\text{от}}$ — число ОТМ, следовательно, $K_{\text{отр}} + 2 K_{\text{от}} > 6$.

Если поправки вычисляются при помощи полиномов второй степени, то точки и отрезки должны располагаться обязательно равномерно-

но по всей площади снимка. Не должно быть участков значительной площади, для которых бы отсутствовали опорные данные. RPC-модели с такими поправками, например, можно использовать для обновления ортофотопланов, т.е., когда координаты точек планово-высотной основы набираются с ранее изготовленного ортофотоплана, а высоты точек планово-высотной основы берутся из цифровой матрицы высот. В этом случае, чтобы число уравнений превышало число определяемых параметров, должно выполняться условие $2(K_{\text{отр}} + K_{\text{от}}) > 12 + K_{\text{отр}}$, следовательно, $K_{\text{отр}} + 2 K_{\text{от}} > 12$.

Авторами статьи разработано программное обеспечение, позволяющее определять поправки к RPC-полиномам космических сканерных снимков высокого разрешения с использованием отрезков треков, линейных объектов и отдельных точек местности. Также разработана технология трансформирования снимков с использованием ПК Photomod. Технология включает в себя следующие процессы.

1. Загрузка снимков в ПК Photomod.
2. Измерение на снимках координат опорных точек, точек отрезков треков и точек отрезков линейных объектов.
3. Экспорт результатов измерений в формате RAT-B.
4. Формирование файла опорных точек в формате $Name, X_{\text{изм}}, Y_{\text{изм}}, B, L, H$, где $Name$ — название точки; $X_{\text{изм}}, Y_{\text{изм}}$ — измеренные пиксельные координаты точки на снимке; B, L, H — геодезические координаты точки на местности; формирование файла отрезков в формате $Name, X_{\text{изм}}, Y_{\text{изм}}, B_1, L_1, H_1, B_2, L_2, H_2$, где $Name$ — название отрезка; $X_{\text{изм}}, Y_{\text{изм}}$ — измеренные пиксельные координаты точки отрезка на снимке; $B_1, L_1, H_1, B_2, L_2, H_2$ — геодезические координаты граничных точек отрезка линейного объекта или трека.

5. Определение поправок к RPC (сдвиг, аффинные или полиномиальные поправки) и параметра t_j , определяющего положение измеренных точек на отрезке.

6. Вычисление геодезических координат точек отрезков, соответствующих параметру t_j ($j = 1, \dots, n$), где n — число отрезков, и форми-

рование файла RAT-B для загрузки геодезических и измеренных координат опорных точек и точек отрезков в ПК Photomod.

7. Выполнение уравнивания загруженных исходных данных опорных точек в ПК Photomod и вычисление поправок типа «сдвиг» или аффинных поправок.

8. Создание ортофотоплана в ПК Photomod.

В программном комплексе Photomod используют поправки только типа «сдвиг» или аффинные.

Практическое применение

При практической апробации разработанной технологии исследовалась возможность геодезической привязки космических зарубежных снимков сверхвысокого разрешения WorldView-2 и отечественных Ресурс-П с использованием в качестве опорных данных точек местности и отрезков треков. Для этого были отобраны снимок WorldView-2 размером 17×30 км на территорию Дмитровского района Московской области с разрешением 0,5 м и снимок Ресурс-П с разрешением 0,8 м такого же размера. Геодезическим спутниковым оборудованием в статическом дифференциальном режиме было измерено 12 опорных точек местности. СКО определения плановых координат и высот не превысило 0,05 м. Также в кинематическом дифференциальном режиме были записаны траектории движения автомобиля (треки) с СКО точек трека 0,3 м. Регистрацию треков выполняли при движении автомобиля вдоль обочины дороги с антенной, закрепленной с правой стороны крыши автомобиля. Измерения, проведенные таким способом, позволяют в дальнейшем минимизировать ошибки при измерении точек на проекциях отрезков треков на снимках [4]. Из записанных треков выбрано 20 отрезков, равномерно распределенных по площади снимков.

Далее приведены результаты уточнения модели RPC для снимка WorldView-2 на территорию Дмитровского района с использованием только отрезков линейных объектов (треков) и с применением совместно отрезков линейных объектов и опорных точек. Снимки были

загружены в ПК Photomod. Установлено, что точность геодезической привязки снимка без опорных точек по навигационным данным (по RPC) составила $СКО_{XY} = 5,3$ м. При уточнении модели RPC по 11 опорным точкам с использованием аффинных поправок $СКО_{XY}$ составила 0,6 пиксел (0,3 м), а при использовании поправок типа «сдвиг» — 0,8 пиксел (0,4 м).

Выбраны 19 отрезков треков, равномерно расположенных на территории, покрывающей изображение снимка на местности с учетом их хаотичной направленности (рис. 1). В соответствии с технологией использования отрезков треков [3] для уточнения RPC-моделей космических сканерных снимков на изображении отрезка трека на снимке необходимо было измерить произвольную точку внутри отрезка. В соответствии с технологией измерения треков на местности [4] отрезки треков располагаются на расстоянии 1–1,5 м от обочины дороги. Следовательно, точка на снимке измеряется на расстоянии 2 пиксел (1 м) от обочины в пределах отрезка трека. При этом есть вероятность

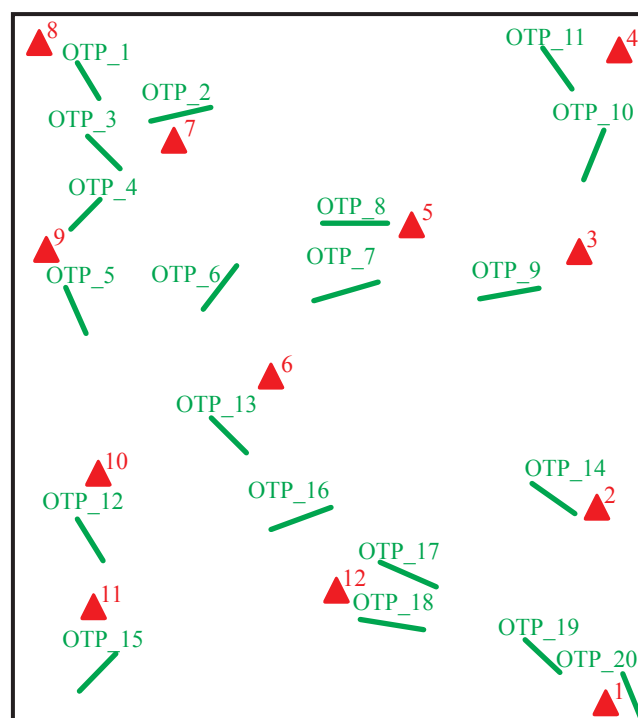


Рис. 1. Схематическое изображение отрезков треков (—) и опорных точек местности (▲)

Fig. 1. Schematic layout of track segments (green lines) and geodetic reference points (red triangles) in the scanner push-broom image

ошибки измерения в 1–2 пиксела. Другой вариант измерения точек отрезков треков — редукция геодезических координат граничных точек отрезков на обочину дороги. Для этого задается расстояние от антенны, закрепленной на крыше автомобиля, до обочины дороги. В этом случае измерения точек отрезков на снимке выполняются непосредственно на линии границы дорожного покрытия.

Ошибку измерения можно значительно уменьшить, если использовать вместо отрезков треков отрезки линейных объектов, граничные точки которых измеряют в статическом режиме.

Выполнено уточнение RPC-полиномов с использованием геодезических координат B , L и H концов отрезков треков и измеренных координат точек в пикселях на изображениях отрезков треков на снимке [4]. Для уточнения модели RPC вычисляли поправки типа «сдвиг», аффинные и полиномиальные поправки с использованием всех 19 отрезков. В табл. 1 приведены результаты контроля уточнения модели RPC по разностям координат на контрольных точках.

Т а б л и ц а 1
Результаты контроля модели RPC

Ошибки	Аффинные поправки	Поправки типа «сдвиг»	Полиномиальные поправки
СКО _x , пиксел	0,706	0,513	0,649
СКО _y , пиксел	0,967	1,111	1,039
СКО _{xy} , пиксел/м	1,197/0,6	1,223/0,6	1,225/0,6
Максимальная ошибка, пиксел/м	1,8/0,90	1,9/0,95	1,9/0,95

Затем выполнено уточнение модели RPC путем вычисления поправок типа «сдвиг», аффинных и полиномиальных поправок с использованием 19 отрезков и 11 опорных точек. В табл. 2 представлены результаты геодезической привязки снимка с использованием поправки «сдвиг».

В табл. 3 представлены результаты геодезической привязки снимка с использованием аффинных поправок, а в табл. 4 — результаты геодезической привязки снимка с использованием полиномиальных поправок.

В статье [2] на примере снимка WorldView-2 показана зависимость точности геодезической

Т а б л и ц а 2

Определение поправок типа «сдвиг» к RPC*, пиксел

Имя	D_x	D_y	D_{xy}
OTR_5	-0,04	0,01	0,04
OTR_17	0,06	-0,08	0,10
OTR_12	-0,09	0,07	0,11
12	0,160,03	0,16	0,16
OTR_15	0,15	0,08	0,17
OTR_16	-0,11	-0,14	0,18
9	0,08	-0,31	0,32
5	-0,26	0,19	0,32
OTR_1	-0,34	0,10	0,36
OTR_8	-0,03	0,36	0,36
OTR_20	-0,34	0,21	0,40
8	0,14	0,44	0,46
OTR_18	0,05	-0,46	0,47
OTR_9	0,01	0,48	0,48
OTR_14	-0,42	0,34	0,54
OTR_13	-0,35	0,43	0,56
10	0,61	-0,16	0,63
OTR_3	-0,50	0,41	0,65
OTR_19	-0,66	0,21	0,70
4	-0,36	-0,68	0,77
OTR_10	-0,73	-0,24	0,77
OTR_11	-0,75	0,30	0,81
6	0,63	-0,61	0,88
11	0,83	-0,39	0,92
2	-0,67	-0,69	0,96
OTR_6	0,92	0,44	1,02
OTR_2	0,33	1,19	1,24
3	0,47	-1,21	1,30
1	0,26	-1,40	1,43
OTR_4	0,96	1,10	1,46
СКО	0,47	0,56	0,73

* D_x, D_y — остаточные невязки на опорных точках: $D_{xy} = \sqrt{D_x^2 + D_y^2}$.

привязки с помощью полиномиальных поправок от числа и расположения опорных точек. Необходимое условие для вычисления полиномиальных поправок — равномерное распределение элементов плано-высотной основы по площади снимка. Наилучшую точность дает применение аффинных поправок. Для определения аффинных поправок минимальное число — четыре точки, расположенные как можно ближе к четырем углам снимка. Для получения поправок типа «сдвиг» достаточно одной точки, расположенной как можно ближе к центру снимка. Результаты контроля геодезической привязки снимка WorldView-2 по одной точке на территорию Дмитровского района даны в табл. 5. В качестве опорной использована точ-

Таблица 3

Определение аффинных поправок к RPC, пиксел

Имя	D_x	D_y	D_{xy}
OTR_18	0,01	-0,02	0,02
OTR_15	-0,09	-0,05	0,11
5	-0,06	0,11	0,12
OTR_10	-0,13	-0,04	0,14
OTR_16	-0,09	-0,12	0,15
OTR_17	-0,11	0,15	0,19
2	-0,20	-0,10	0,22
OTR_11	-0,22	0,09	0,24
OTR_8	-0,02	0,26	0,26
OTR_12	-0,23	0,18	0,29
OTR_5	-0,34	0,04	0,35
OTR_1	-0,34	0,10	0,36
OTR_3	-0,31	0,25	0,40
8	-0,13	-0,42	0,45
10	0,15	-0,46	0,48
11	0,45	-0,25	0,52
12	0,20	0,49	0,53
OTR_14	-0,42	0,34	0,54
OTR_20	-0,46	0,29	0,54
OTR_13	-0,35	0,43	0,56
OTR_19	-0,58	0,18	0,60
OTR_6	0,55	0,26	0,61
OTR_2	0,18	0,65	0,68
4	0,26	-0,64	0,69
OTR_4	0,46	0,53	0,70
OTR_9	0,01	0,71	0,71
1	0,61	-0,46	0,77
6	0,57	-0,67	0,89
9	-0,32	-0,89	0,94
3	0,95	-0,94	1,34
СКО	0,36	0,42	0,56

Таблица 4

Определение полиномиальных поправок к RPC, пиксел

Имя	D_x	D_y	D_{xy}
OTR_8	-0,01	0,01	0,02
OTR_10	0,03	0,01	0,03
2	-0,03	0,02	0,04
OTR_15	-0,08	-0,05	0,09
OTR_17	-0,07	0,09	0,12
OTR_18	0,02	-0,17	0,17
OTR_5	-0,23	0,03	0,23
4	0,18	-0,18	0,25
10	0,24	-0,06	0,25
11	0,25	0,11	0,27
OTR_1	-0,27	0,08	0,28
5	-0,26	-0,13	0,29
OTR_3	-0,22	0,18	0,29
12	0,00	0,32	0,32
OTR_2	0,10	0,38	0,39
OTR_16	-0,25	-0,32	0,41
OTR_20	-0,35	0,22	0,42
OTR_12	-0,36	0,28	0,45
OTR_11	-0,45	0,18	0,49
OTR_14	-0,38	0,31	0,49
OTR_13	-0,32	0,40	0,51
OTR_19	-0,50	0,15	0,52
8	-0,03	-0,53	0,53
OTR_6	0,50	0,24	0,55
OTR_4	0,46	0,53	0,70
OTR_9	0,01	0,71	0,71
1	0,61	-0,46	0,77
6	0,57	-0,67	0,89
9	-0,32	-0,89	0,94
3	0,95	-0,94	1,34
СКО	0,35	0,38	0,52

ка № 6. Остальные точки — контрольные.

Для определения поправки типа «сдвиг» минимальным количеством являются два отрезка. На точность геодезической привязки снимка путем определения поправки типа «сдвиг» влияет величина угла между отрезками и точность измерения точек на этих отрезках. В табл. 6 приведены результаты контроля геодезической привязки снимка путем вычисления поправки типа «сдвиг» по двум отрезкам. В этой же таблице представлены $СКО_{xy}$ на контрольных точках, включающие в себя систематическую ошибку и максимальные ошибки V_{xy} :

$$СКО_{xy} = \sqrt{СКО_x^2 + СКО_y^2}; V_{xy} = \sqrt{V_x^2 + V_y^2}.$$

Из табл. 6 видно, что углы между отрезками не должны быть меньше 5°. Точность улучша-

ется с увеличением угла. Кроме того, точность зависит от точности измерения точек на отрезках треков на снимках. В данном случае мы измеряем точки на изображениях отрезков треков на снимках, которые мы визуально не видим,

Таблица 5

Невязки на контрольных точках, пиксел

Имя	D_x	D_y	D_{xy}
11	0,20	0,22	0,30
10	-0,02	0,45	0,45
3	-0,16	-0,60	0,62
9	-0,55	0,30	0,63
12	-0,47	0,64	0,79
1	-0,37	-0,79	0,87
4	-0,99	-0,07	0,99
8	-0,49	1,04	1,16
5	-0,89	0,80	1,20
2	-1,30	-0,08	1,31
СКО	0,67	0,59	0,89

Контроль точности геодезической привязки снимка WorldView-2 по двум отрезкам

Номер первого отрезка	Номер второго отрезка	Угол между отрезками, градусы	СКО _{XY} пиксел	V _{XY} пиксел	Номер первого отрезка	Номер второго отрезка	Угол между отрезками, градусы	СКО _{XY} пиксел	V _{XY} пиксел
OTR_3	OTR_12	1	21,6	22,4	OTR_1	OTR_13	34	1,2	2,0
OTR_8	OTR_18	2	19,6	19,7	OTR_3	OTR_8	46	1,2	2,0
OTR_13	OTR_17	3	10,4	10,9	OTR_5	OTR_17	47	0,78	1,2
OTR_11	OTR_19	5	2,1	2,9	OTR_10	OTR_12	56	1,0	1,5
OTR_12	OTR_20	6	2,7	3,2	OTR_6	OTR_20	58	2,0	2,8
OTR_3	OTR_20	7	2,5	3,3	OTR_4	OTR_17	60	1,8	2,4
OTR_1	OTR_5	9	2,5	3,3	OTR_1	OTR_16	68	1,0	1,5
OTR_13	OTR_14	11	1,2	1,9	OTR_4	OTR_13	80	1,9	2,7
OTR_3	OTR_17	15	2,8	3,4	OTR_4	OTR_17	76	1,8	2,4
OTR_4	OTR_10	30	4,7	5,6	OTR_5	OTR_9	83	1,1	1,8
OTR_13	OTR_18	32	2,0	2,6	OTR_14	OTR_16	89	1,1	1,8
OTR_3	OTR_5	32	1,7	2,5	OTR_12	OTR_16	90	0,86	1,4
OTR_5	OTR_14	32	1,6	2,3	OTR_3	OTR_16	90	1,26	1,8

но знаем, что они находятся на расстоянии примерно 1 м (2 пиксел) от изображения обочины дороги на снимке. Поэтому возможны ошибки измерения, которые будут влиять на точность геодезической привязки. Из табл. 2, в которой приведены результаты уточнения модели RPC по всем отрезкам и опорным точкам с применением поправки типа «сдвиг», видно, что измерения на отрезках 5 и 17 выполнены достаточно хорошо. СКО_{XY} на контрольных точках при геодезической привязке по этим отрезкам составляет 0,78 пиксел (0,4 м), а максимальная ошибка — 1,2 пиксел (0,6 м). Это лучше, чем результаты геодезической привязки при использовании точки № 6 (см. табл. 5)

Таким образом, для уточнения модели RPC снимков WorldView-2 по двум отрезкам необходимо выбирать отрезки линейных объектов с как можно большими углами между ними, а сами линейные объекты должны быть такими, чтобы их изображения были хорошо различимы на снимке (заборы, бордюрные ограждения и т.д.). Измерения координат концов отрезков в этом случае выполняют с помощью спутникового геодезического оборудования в статическом режиме. На ту же территорию, на которую был выбран снимок WorldView-2, получен снимок размером 17×30 км, который отражал часть маршрута Ресурс-П1. Уровень обработки — 2А. Точность геодезической привязки снимка без опорных точек по навигационным дан-

ным (по RPC) составила: СКО_{XY} = 9,2 пиксел (8 м). При использовании поправок типа «сдвиг» СКО_{XY} равна 4,6 пиксел (4 м). Таким образом, можно сделать вывод, что использовать модель «сдвиг» для снимков Ресурс-П нецелесообразно.

Было выполнено уточнение RPC-модели с использованием 19 отрезков путем вычисления аффинных и полиномиальных поправок. Результаты проверки уточнения RPC-модели по 12 контрольным точкам представлены в табл. 7 и 8.

В табл. 9 и 10 представлены результаты геодезической привязки снимка Ресурс-П по 19 отрезкам и 12 опорным точкам путем вычисления аффинных (см. табл. 9) и полиномиальных (см. табл. 10) поправок к RPC.

Рассмотрим различные сочетания опорных точек и отрезков линейных объектов при их минимально допустимом числе для вычисления аффинных поправок к RPC. Схемы расположения точек и отрезков линейных объектов (отрезков треков) даны на рис. 2. Оценена точность геодезической привязки снимка по опорным данным, приведенным на рис. 2, с использованием контрольных точек. Результаты оценки точности даны в табл. 11.

Предложенная технология позволяет выполнять геодезическую привязку зарубежных и отечественных снимков с использованием опорных точек местности, отрезков линейных объектов и отрезков треков.

Таблица 7

Отклонения на контрольных точках при уточнении модели RPC с использованием аффинных поправок, пиксел

Имя	D_x	D_y	D_{xy}
9	0,07	0,42	0,42
1	0,23	0,83	0,86
2	0,87	0,38	0,95
12	1,08	-0,01	1,08
5	1,12	-0,23	1,14
11	1,31	-0,32	1,35
7	1,38	-0,03	1,38
3	1,52	-0,37	1,57
4	0,83	1,56	1,76
6	1,76	-0,20	1,77
10	1,65	-0,91	1,88
8	1,60	1,48	2,18
СКО	1,23	0,75	1,44

Таблица 8

Отклонения на контрольных точках при уточнении модели RPC с использованием полиномиальных поправок, пиксел

Имя	D_x	D_y	D_{xy}
12	0,12	-0,16	0,20
9	0,26	-0,25	0,36
5	0,36	0,33	0,49
11	0,64	-0,12	0,65
7	0,88	-0,15	0,90
2	0,43	-0,86	0,96
4	0,34	0,96	1,02
3	0,97	-0,62	1,16
6	1,05	0,59	1,20
10	1,62	-0,88	1,85
8	1,86	-0,67	1,97
1	-0,34	-2,36	2,38
СКО	0,91	0,88	1,27

Таблица 9

Невязки на опорных точках и точках отрезков при уточнении модели RPC с использованием аффинных поправок, пиксел

Имя	D_x	D_y	D_{xy}
OTR_16	0,002	0,002	0,003
OTR_15	-0,01	0,00	0,01
OTR_17	0,05	-0,07	0,09
OTR_18	-0,02	0,13	0,13
OTR_10	0,23	0,07	0,24
OTR_2	0,08	0,29	0,31
2	0,32	0,06	0,33
OTR_12	-0,27	0,21	0,34
OTR_13	0,24	-0,29	0,38
OTR_11	-0,40	0,16	0,43
OTR_6	-0,44	-0,21	0,49
12	0,52	0,02	0,52
OTR_19	-0,65	0,20	0,69
OTR_7	-0,27	-0,64	0,69
11	0,71	-0,03	0,71
9	-0,64	0,40	0,75
5	0,48	-0,59	0,76
7	0,68	-0,35	0,77
1	-0,26	0,77	0,81
OTR_3	-0,65	0,53	0,84
OTR_9	-0,01	-0,86	0,86
4	0,19	0,86	0,88
OTR_14	-0,72	0,59	0,93
OTR_20	-0,89	0,55	1,05
OTR_5	-1,06	0,15	1,07
6	1,13	-0,30	1,17
10	0,98	-0,74	1,23
3	0,92	-0,85	1,25
OTR_1	-1,25	0,37	1,31
8	0,86	1,23	1,50
OTR_8	0,12	-1,64	1,65
СКО	0,61	0,57	0,83

Таблица 10

Невязки на опорных точках и точках отрезков при уточнении модели RPC с использованием полиномиальных поправок, пиксел

Имя	D_x	D_y	D_{xy}
OTR_2	0,01	0,05	0,05
OTR_20	-0,05	0,03	0,06
5	-0,07	-0,01	0,08
OTR_10	0,12	0,04	0,13
12	0,06	0,22	0,23
OTR_7	-0,10	-0,24	0,26
OTR_16	0,16	0,21	0,26
OTR_12	-0,23	0,17	0,29
11	0,29	-0,08	0,30
OTR_19	-0,32	0,10	0,34
9	-0,28	0,22	0,36
OTR_18	-0,04	0,38	0,39
4	-0,09	0,40	0,41
OTR_17	-0,24	0,34	0,41
OTR_3	-0,32	0,27	0,42
OTR_9	-0,01	-0,42	0,42
OTR_15	-0,38	-0,21	0,44
OTR_11	-0,41	0,17	0,44
OTR_6	-0,41	-0,20	0,46
OTR_13	-0,30	0,37	0,48
7	0,31	-0,37	0,48
2	0,55	0,00	0,55
1	0,17	-0,59	0,61
6	0,65	0,47	0,80
OTR_1	-0,78	0,23	0,82
OTR_5	-0,81	0,11	0,82
OTR_14	-0,70	0,57	0,91
3	0,77	-0,57	0,96
OTR_8	0,07	-0,97	0,97
10	1,12	-0,60	1,27
8	1,28	-0,09	1,28
СКО	0,48	0,36	0,60

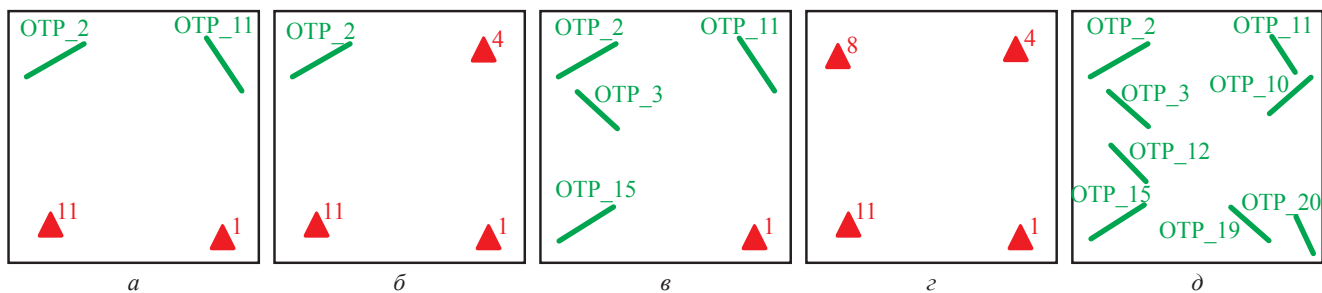


Рис. 2. Схемы расположения опорных точек и отрезков треков (а–д)

Fig. 2. Schematic layouts of track segments (green lines) and geodetic reference points (red triangles) (a–d)

Таблица 11

Оценка точности геодезической привязки по контрольным точкам

Ошибка	Рис. 2, а	Рис. 2, б	Рис. 2, в	Рис. 2, г	Рис. 2, д
СКО _x , пиксел	0,68	0,72	1,16	0,68	1,12
СКО _y , пиксел	0,85	0,91	0,93	1,11	1,27
СКО _{xy} , пиксел/м	1,09/0,87	1,16/0,93	1,49/1,17	1,31/1,05	1,69/1,35
Максимальная ошибка, пиксел/м	1,88/1,5	1,92/1,54	2,24/1,79	1,94/1,55	2,6/2,08

Заключение

К основным преимуществам предложенных методов ориентирования космических сканерных снимков относятся:

1) оперативность получения данных для планово-высотной основы в случае использования треков;

2) улучшение точности геодезической привязки снимков при использовании отрезков;

3) увеличение состава исходных данных при ориентировании малоинформативных снимков.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Онъков И.В.* Исследование геометрической точности ортоснимков WorldView-2 созданных с использованием цифровой модели рельефа Земли SRTM // *Геоматика*. 2011. № 4. С. 56–63.
2. *Онъков И.В.* Анализ точности ортоснимков WorldView-2 в зависимости от метода геометрической коррекции по опорным точкам // *Геоматика*. 2013. № 1. С. 24–31.
3. *Аксенов А.Л., Козлов О.И.* Способ геодезической привязки космических сканерных снимков // *Изв. вузов «Геодезия и аэрофотосъемка»*. 2018. Т. 62. № 3. С. 277–282.
4. *Аксенов А.Л., Козлов О.И.* Навигационные треки как альтернатива планово-высотной основы // *Изв. вузов «Геодезия и аэрофотосъемка»*. 2018. Т. 62. № 6. С. 624–631.
5. *Xutong Nij, Jue Wang, Kaichang Di, Jin-Duk Lee, Ron Li.* Geometric Modelling and Photogrammetric Processing of High-Resolution Satellite Imagery. Commission IV, WG IV/7, 2004. P. 436–441.

REFERENCES

1. *On'kov I.V.* Analysis of WorldView-2 orthophotos geometric accuracy generated by using digital terrain SRTM model. *Geomatika*. Geomatics. 2011, 4: 56–63. [In Russian].
2. *On'kov I.V.* Analysis of the accuracy of orthographic WorldView-2 in dependence to the method of geometric correction by reference points. *Geomatika*. Geomatics. 2013, 1: 24–31. [In Russian].
3. *Aksenov A.L., Kozlov O.I.* The method of geodetic bridging for high-resolution push broom scanner images. *Izvestiya vuzov «Geodeziya i aerofotosyemka»*. *Izvestia vuzov «Geodesy and Aerophotosurveying»*. 2018, 62 (3): 277–282. [In Russian].
4. *Aksenov A.L., Kozlov O.I.* Navigation tracks as an alternative to the high-rise basis. *Izvestiya vuzov «Geodeziya i aerofotosyemka»*. *Izvestia vuzov «Geodesy and Aerophotosurveying»*. 2018, 62 (6): 624–631. [In Russian].
5. *Xutong Nij, Jue Wang, Kaichang Di, Jin-Duk Lee, Ron Li.* Geometric Modelling and Photogrammetric Processing of High-Resolution Satellite Imagery. Commission IV, WG IV/7, 2004: 436–441.