

И. В. Оньков (ЗАО «Мобиле», Пермь)

В 1970 г. окончил МИИГАиК по специальности «астрономо-геодезия». В настоящее время — научный консультант ЗАО «Мобиле» (Пермь). Кандидат технических наук, доцент.

Оценка точности ЦМР, созданных по стереопарам триплета КА ТН-1 в программном комплексе ENVI

ВВЕДЕНИЕ

Два космических аппарата серии ТН-1 (ТН-1-1, ТН-1-2) — первые китайские спутники дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), оснащенные стереокамерой с разрешением 5 м для получения стереоснимков в виде триплета, а также панхроматической камерой с высоким разрешением 2 м и мультиспектральной камерой с разрешением 10 м. Спутники предназначены для решения таких задач, как построение цифровых моделей рельефа (ЦМР), создание и обновление топографических карт масштаба 1:50 000 [1].

Исследования геометрической точности ортофотоплана, созданного по панхроматическому

снимку ТН-1 с разрешением 2 м с использованием для ортотрансформирования глобальной цифровой модели рельефа Земли SRTM 3.0 и коэффициентов RPC, подтвердили возможность создания планового картографического материала масштаба 1:25 000 [2].

В данной работе приведены результаты исследования точности высот ЦМР, созданных по стереоснимкам этих спутников триплета. Построение ЦМР выполнено в программном комплексе ENVI процедурой DEM Extraction.

Исходные снимки триплета в формате TIFF с файлами коэффициентов RPC на территорию г. Перми (рис. 1) были предоставлены компанией «Совзонд».



Рис. 1. Исходные снимки триплета КА ТН-1-1 территории г. Перми

ТЕХНОЛОГИЯ ПОСТРОЕНИЯ ЦМР И ОЦЕНКИ ТОЧНОСТИ

Из трех снимков триплета SXZ_1 (forward), SXZ_2 (nadir) и SXZ_3 (backward) была сформирована стереопара forward-backward, по которой были построены ЦМР в двух вариантах:

- без наземных опорных точек (свободная ЦМР);
- с одной опорной наземной точкой, координаты и высоты которой были определены из GPS-наблюдений.

Создание ЦМР выполнялось в системе плоских прямоугольных координат проекции UTM-40 и системе геодезических высот от поверхности эллипсоида WGS-84 с размером шага сетки матрицы высот 10, 20 и 50 м. Пример ЦМР с шагом сетки 50 м в растровой форме приведен на рис. 2.

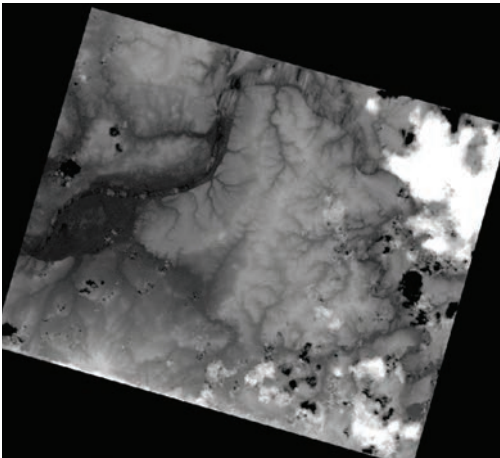


Рис. 2. Цифровая модель рельефа, построенная по стереопаре триплета forward-backward

Для анализа точности ЦМР были выбраны три эталонных участка местности с различным типом поверхности и характером рельефа:

1. Плоскоравнинная территория без наземных построек и древесной растительности (пашня), перепад высот 4 м, площадь 3,5 кв. км.

2. Плоскоравнинная территория с небольшим участком застройки сельского типа, кустарниковая растительность, перепад высот 11 м, площадь 3 кв. км.

3. Сочетание плоскоравнинной и пересеченной местности с застройкой разного типа (сельские населенные пункты, промышленная территория), кустарниковая и лесная растительность, перепад высот 84 м, площадь 86 кв. км.

Схема расположения эталонных участков приведена на рис. 3.

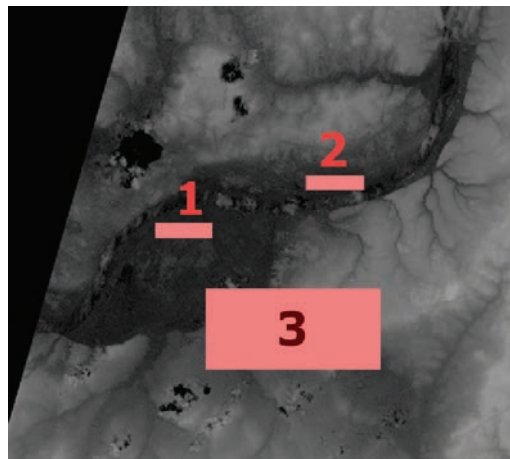


Рис. 3. Схема расположения эталонных участков

В качестве контрольных точек для оценки точности высот ЦМР использовались координаты и подписанные отметки топографической поверхности, снятые с растровых копий планшетов топографической съемки г. Перми масштаба 1:2000–1:5000 с высотой сечения рельефа 1 м. Примеры расположения контрольных точек эталонных участков 2 и 3 на снимках WorldView-2 приведены на рис. 4 и 5. Координаты и отметки точек, снятые с цифровых топографических планов в системе координат города и Балтийской системе высот, преобразовывались в координаты проекции UTM-40 и систему высот относительно эллипсоида WGS-84 в соответствии с ГОСТ [3]



Рис. 4. Схема расположения контрольных точек на эталонном участке 2



Рис. 5. Схема расположения контрольных точек на эталонном участке 3

и использованием цифровой модели Земли EGM96 [4].

Исходным материалом для оценки точности служили разности высот $H_{ЦМР}$ и отметок земной поверхности $H_{Торо}$:

$$\Delta H = H_{ЦМР} - H_{Торо}$$

Отметки высот $H_{ЦМР}$ в заданных точках рассчитывались путем интерполирования матрицы высот ЦМР двумерными полиномами первой степени с использованием стандартных программ библиотеки численного анализа вычислительного центра МГУ [5].

При статистической обработке данных принималась аддитивная модель ошибок, согласно которой разности высот ЦМР и поверхности Земли рассматривались в виде суммы систематической Δ_H и случайной δ_H ошибок:

$$\Delta H = \Delta_H + \delta_H$$

В качестве основных показателей точности модели были приняты следующие параметры:

- среднее значение разности высот, оценка систематической ошибки (n – число точек):

$$\bar{\Delta}_H = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta H_i$$

- средняя квадратическая ошибка (Root Mean Square Error):

$$RMSE_{\Delta H} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta H_i^2}$$

- средняя абсолютная ошибка (Mean Absolute Error):

$$MAE_{\Delta H} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\Delta H_i|$$

- вероятная линейная ошибка (Linear Error) $LE_{90\Delta H}$, оцениваемая как 90% вариационного ряда абсолютных значений разностей ΔH_i ;

- минимальное ΔH_{min} и максимальное ΔH_{max} значения разностей высот.

После исключения систематической ошибки из результатов измерений $\Delta h_i = \Delta H_i - \Delta_H$ оценивались параметры случайной составляющей δ_H :

- стандартная средняя среднеквадратическая ошибка:

$$\sigma_{\Delta h} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \Delta h_i^2}$$

- центрированная средняя абсолютная ошибка:

$$\theta_{\Delta h} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n |\Delta h_i|}$$

- минимальное ΔH_{min} и максимальное ΔH_{max} значения разностей высот.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Всего в статистическую обработку было взято 2479 контрольных точек, в том числе по первому участку — 826 точек, по второму участку — 761 точка, по третьему участку — 892 точки. В обоих вариантах построения ЦМР для исследования точности использовались одни и те же контрольные точки.

В табл. 1–3 приведены результаты оценки точности высот ЦМР в первом варианте, без использования наземных опорных точек (свободные ЦМР).

Анализ результатов, приведенных в табл. 1–3, показывает, что основной вклад в ошибку высоты свободной ЦМР вносит систематическая ошибка, которая слабо зависит от характера местности эталонных

участков и шага сетки матрицы высот и составляет в среднем от -8 до -10 м. Наиболее вероятной причиной появления систематической ошибки ΔH_0 можно считать погрешности орбитальной привязки КА.

Случайная составляющая ошибки δH имеет выраженную зависимость от характера местности и рельефа (минимальная для первого участка плоскоравнинной открытой местности без построек и растительности и максимальная для пересеченной территории с наземными постройками и растительностью).

Для всех эталонных участков случайная ошибка уменьшается с увеличением шага матрицы высот, вызванного очевидным эффектом сглаживания.

В табл. 4–6 приведены результаты оценки

| Показатели точности, м | Шаг сетки матрицы высот, м | | |
|------------------------|----------------------------|--------|--------|
| | 10 | 20 | 50 |
| $\bar{\Delta}_H$ | -9,66 | -10,24 | -10,24 |
| $RMSE_{\Delta H}$ | 10,08 | 10,45 | 10,40 |
| $MAE_{\Delta H}$ | 9,66 | 10,24 | 10,24 |
| $LE90_{\Delta H}$ | 13,62 | 12,91 | 12,52 |
| ΔH_{min} | -20,15 | -19,75 | -16,73 |
| ΔH_{max} | 0,19 | -0,72 | -5,41 |
| $\sigma_{\Delta H}$ | 2,88 | 2,06 | 1,84 |
| $\theta_{\Delta H}$ | 2,26 | 1,64 | 1,46 |
| Δh_{min} | -10,49 | -9,51 | -6,49 |
| Δh_{max} | 9,85 | 9,52 | 4,83 |

Табл. 1. Эталонный участок 1

| Показатели точности, м | Шаг сетки матрицы высот, м | | |
|------------------------|----------------------------|--------|--------|
| | 10 | 20 | 50 |
| $\bar{\Delta}_H$ | -8,79 | -8,14 | -8,11 |
| $RMSE_{\Delta H}$ | 9,48 | 8,70 | 8,54 |
| $MAE_{\Delta H}$ | 8,84 | 8,18 | 8,12 |
| $LE90_{\Delta H}$ | 12,95 | 11,83 | 11,08 |
| ΔH_{min} | -25,11 | -21,04 | -20,61 |
| ΔH_{max} | 7,68 | 6,89 | 1,89 |
| $\sigma_{\Delta H}$ | 3,54 | 3,06 | 2,68 |
| $\theta_{\Delta H}$ | 2,68 | 2,35 | 2,10 |
| Δh_{min} | -16,32 | -12,90 | -12,50 |
| Δh_{max} | 16,47 | 15,03 | 10,00 |

Табл. 2. Эталонный участок 2

| Показатели точности, м | Шаг сетки матрицы высот, м | | |
|------------------------|----------------------------|--------|--------|
| | 10 | 20 | 50 |
| $\bar{\Delta}_H$ | -8,47 | -7,96 | -8,05 |
| $RMSE_{\Delta H}$ | 11,20 | 9,12 | 8,87 |
| $MAE_{\Delta H}$ | 9,36 | 8,21 | 8,12 |
| $LE90_{\Delta H}$ | 14,28 | 12,42 | 12,31 |
| ΔH_{min} | -50,30 | -29,94 | -19,05 |
| ΔH_{max} | 73,61 | 13,93 | 2,93 |
| $\sigma_{\Delta H}$ | 7,33 | 4,46 | 3,72 |
| $\theta_{\Delta H}$ | 4,26 | 3,16 | 2,86 |
| Δh_{min} | -41,83 | -21,98 | -11,00 |
| Δh_{max} | 82,08 | 21,89 | 10,98 |

Табл. 3. Эталонный участок 3

точности высот ЦМР во втором варианте, с использованием одной опорной наземной точки, в качестве которой была выбрана бетонная площадка размером 2x2 м, хорошо опознаваемая на снимках стереопары. Координаты и высота опорной точки определены из GPS-наблюдений.

Анализ результатов, приведенных в табл. 4–6, показывает, что использование только одной опорной точки при создании ЦМР практически полностью компенсирует систематическую ошибку высот ЦМР ΔH_1 , в то время как величина случайной составляющей ошибки высоты ЦМР δH остается на прежнем уровне. Зависимость ее от типа местности и шага сетки матрицы высот носит примерно такой же характер, как и в случае свободной ЦМР.

| Показатели точности, м | Шаг сетки матрицы высот, м | | |
|------------------------|----------------------------|-------|-------|
| | 10 | 20 | 50 |
| $\bar{\Delta}_H$ | -1,20 | -1,26 | -1,30 |
| $RMSE_{\Delta H}$ | 2,85 | 2,69 | 2,49 |
| $MAE_{\Delta H}$ | 2,20 | 2,09 | 1,91 |
| $LE90_{\Delta H}$ | 4,77 | 4,60 | 4,06 |
| ΔH_{min} | -9,93 | -8,65 | -9,08 |
| ΔH_{max} | 6,11 | 4,63 | 4,55 |
| $\sigma_{\Delta H}$ | 2,59 | 2,37 | 2,13 |
| $\theta_{\Delta H}$ | 2,06 | 1,88 | 1,67 |
| Δh_{min} | -8,73 | -7,39 | -7,78 |
| Δh_{max} | 7,31 | 5,89 | 5,85 |

Табл. 4. Эталонный участок 1

| Показатели точности, м | Шаг сетки матрицы высот, м | | |
|------------------------|----------------------------|-------|--------|
| | 10 | 20 | 50 |
| $\bar{\Delta}_H$ | -0,26 | -0,26 | -0,28 |
| $RMSE_{\Delta H}$ | 2,93 | 2,70 | 2,52 |
| $MAE_{\Delta H}$ | 2,28 | 2,10 | 1,99 |
| $LE90_{\Delta H}$ | 4,76 | 4,36 | 4,02 |
| ΔH_{min} | -11,95 | -9,98 | -11,29 |
| ΔH_{max} | 10,72 | 11,03 | 9,99 |
| $\sigma_{\Delta H}$ | 2,92 | 2,69 | 2,51 |
| $\theta_{\Delta H}$ | 2,28 | 2,09 | 1,97 |
| Δh_{min} | -11,69 | -9,72 | -11,01 |
| Δh_{max} | 10,98 | 11,29 | 10,27 |

Табл. 5. Эталонный участок 2

| Показатели точности, м | Шаг сетки матрицы высот, м | | |
|------------------------|----------------------------|--------|--------|
| | 10 | 20 | 50 |
| $\bar{\Delta}_H$ | 0,18 | 0,25 | 0,46 |
| $RMSE_{\Delta H}$ | 4,91 | 4,57 | 4,36 |
| $MAE_{\Delta H}$ | 3,27 | 2,99 | 2,79 |
| $LE90_{\Delta H}$ | 6,96 | 6,32 | 6,25 |
| ΔH_{min} | -23,34 | -20,08 | -17,69 |
| ΔH_{max} | 38,19 | 38,60 | 32,09 |
| $\sigma_{\Delta H}$ | 4,91 | 4,57 | 4,34 |
| $\theta_{\Delta H}$ | 3,28 | 3,01 | 2,80 |
| Δh_{min} | -23,52 | -20,33 | -18,15 |
| Δh_{max} | 38,01 | 38,35 | 31,63 |

Табл. 6. Эталонный участок 3

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При создании и обновлении высотной составляющей топографических карт и планов отметки высот в узлах сетки матрицы высот ЦМР можно рассматривать как «подписываемые отметки» для построения рельефа местности в виде горизонталей.

В соответствии с инструкцией [6] средние ошибки высот, подписываемых на топографических картах масштабов 1:25 000, 1:50 000, 1:100 000, относительно ближайших пунктов и точек геодезической основы для равнинных, пересеченных и холмистых с преобладанием уклона до 6 градусов местностей, не должны превышать величин: 1:25 000 — 1,6 м, 1:50 000 — 3,0 м, 1:100 000 — 7,0 м.

Полученные значения средних ошибок высот ($MAE_{\Delta H}$) свободной ЦМР (табл. 1–3) вне зависимости от шага сетки матрицы высот и типа местности превышают допустимые значения 7 м даже для масштаба 1:100 000.

Полученное значение вероятной ошибки высоты во всех случаях также превышает заявленную поставщиком величину 10 м для ЦМР, созданных без наземных опорных точек.

Значения средних ошибок высот ($MAE_{\Delta H}$) ЦМР с одной опорной точкой (табл. 4–6) для всех трех эталонных участков с шагом матрицы высот 20 и 50 м не превышают допустимого значения 3 м для масштаба 1:50 000.

На основании полученных результатов можно сделать вывод о возможности использования снимков триплета КА серии ТН-1 для создания по стереопаре forward-backward с использованием хотя бы одной опорной наземной точки в программном продукте ENVI цифровых моделей местности, удовлетворяющих требованиям к точности высот топографических карт масштаба 1:50 000.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дворкин Б. А. Новейшие и перспективные спутники дистанционного зондирования Земли / Б. А. Дворкин, С. А. Дудкин // *Геоматика*. – 2013. – №2. – С. 16–39.
2. Оньков И. В. Исследования геометрической точности космического снимка со спутника ТН-1 // *Геоматика*. – 2013. – №3 (20). – С. 22–24.
3. ГОСТ Р 51794–2008. Глобальные навигационные спутниковые системы. Системы координат. Методы преобразований координат определяемых точек. – М.: Стандартинформ, – 2009. – 19 с.
4. <http://earth-info.nga.mil/GandG/wgs84/gravitymod/egm96/egm96.html>
5. http://www.sccc.msu.su/num_anal/lib_na/libnal.htm
6. ГКИНП-05-029-84 – Основные положения по созданию и обновлению топографических карт масштабов 1:10 000, 1:25 000, 1:50 000, 1:100 000, 1:200 000, 1:500 000, 1:1 000 000. – М.: Редакционно-издательский отдел ВТС, 1984. – 33 с.