

МЕТОД ВЫСОКОТОЧНОГО КАРТОГРАФИРОВАНИЯ ПО ДАННЫМ СТЕРЕОСЪЁМКИ И ЛАЗЕРНОГО ДАЛЬНОМЕРА

Кузнецов А.Е., д.т.н., зам. директора НИИ «Фотон» РГРТУ, г. Рязань, e-mail: foton@rsreu.ru.

THE HIGH ACCURACY MAPPING METHOD BY STEREO IMAGING DATA

Kuznetsov A.E.

In the paper are described a problems of the Earth surface large scale mapping by remote sensing stereo data without using of ground control points (GCP). It is shown that height detection accuracy by stereo images must be in some times higher than accuracy of plane coordinates of on ground objects. The analysis showed that because of errors of satellite external orientation elements determination the systematical errors are in the on ground objects height detection calculations. Experiment results confirming of systematical errors while making of surface height map are shown in the paper. The algorithm of systematical errors compensation by using measurements of LIDAR is presented. The formula of the method which allows to build a more accurate height map is shown. The orthoplan of mapping territory which is not provided by GCP and digital relief model is build using this height map.

Key words: stereo images, LIDAR, model of stereoprocessing, height map, systematical errors, correction coefficient.

Ключевые слова: стереоизображения, лазерный дальномер, модель стереообработки, карта высот, систематические погрешности, поправочный коэффициент.

Введение

Стереоизображения предназначены для вычисления трёхмерных координат наблюдаемых территорий и формирования крупномасштабных карт местности, например, масштаба 1:25000. На картах такого масштаба плановые координаты объектов земной поверхности определяются со среднеквадратической ошибкой (СКО) не более 12 м, а их высоты с СКО 2,5-3 м. Для проведения стереосъёмки спутники либо оснащаются двумя телескопами [1], либо выполняют конвергентную съёмку местности одним телескопом за счёт разворота космического аппарата (КА) по углу тангажа (КА типа «Ресурс-П», PLEIADES и др.). Угол, под которым выполняется наблюдение заданной территории с двух точек, называется углом конвергенции, значения которого задают в пределах от 40° до 60°.

Методы обработки стереоизображений, особенно от кадровых систем дистанционного зондирования, достаточно подробно рассмотрены в литературе [2, 3]. Их особенность состоит в том, что на основе известных координат опорных точек местности, идентифицированных на стереоснимках, выполняется уточнение элементов внешнего ориентирования камеры (угловой ориентации и пространственного положения для двух точек положения КА). После этого с использованием метода прямой фотограмметрической засечки определяются трёхмерные (3D) координаты объектов земной поверхности. Достижимые при этом точности определения плановых и высотных координат объектов, наблюдаемых на стереоснимках, соответствуют точности задания координат опорных точек, что позволяет решать задачу уточнения карт масштаба 1:25000 и крупнее.

Рассматриваются проблемные вопросы, связанные с крупномасштабным картографированием территорий по данным космической стереосъёмки без использования опорных точек местности. Показано, что точность определения по снимкам высоты должна быть в несколько раз выше, чем плановых координат объектов местности. Проведённый анализ показывает, что из-за погрешностей определения элементов внешнего ориентирования спутника в расчетах высоты объектов присутствуют систематические ошибки. Приводятся результаты эксперимента, подтверждающие наличие систематических ошибок при формировании карты высот местности. Описывается алгоритм компенсации систематических ошибок с помощью измерений лазерного дальномера. Приводится формула метода, позволяющего получать уточнённую карту высот и на её основе ортоплана картографируемой территории, не обеспеченной опорными точками и цифровой моделью рельефа.

К сожалению, для случаев, когда отсутствуют опорные точки для наблюдаемых территориях, известные решения оказываются не работоспособными. Поэтому актуальной является задача высокоточного определения трёхмерных координат объектов земной поверхности при отсутствии опорных точек местности. Для её решения проанализируем источники ошибок, возникающих при стереообработке сканерных снимков, и рассмотрим метод, позволяющий повысить точность определения высотных координат объектов и формировать высокоточные 3D-карты для любых территорий земной поверхности.

Модель обработки стереоизображений

Обработка двух изображений земной поверхности $I_1(m_1, n_1)$ и $I_2(m_2, n_2)$, $m_1, m_2 \in [1, M]$, $n_1, n_2 \in [1, N]$, получаемых при стереосъёмке, выполняется на основе строгой модели функционирования съёмочной системы. Модель устанавливает для каждого снимка аналитическую зависимость между пиксельными (m_i, n_i) , $i = 1, 2$ и геодезическими (φ, λ) координатами в зависимости от

высоты местности h , линейных \mathbf{p}_i , угловых $\mathbf{\Omega}_i$ элементов внешнего и внутреннего \mathbf{r}_i ориентирования, а также конструктивных углов камеры \mathbf{R}_i . Для случая однопленочной съёмки значения $\mathbf{r}_1 = \mathbf{r}_2$ и $\mathbf{R}_1 = \mathbf{R}_2$. Процесс построения модели рассмотрен в [4], поэтому запишем искомую зависимость в виде обобщённых уравнений для случаев прямого и обратного координатного соответствия:

$$\begin{aligned} \varphi &= \Phi(m_i, n_i, h, \mathbf{R}_i, \mathbf{p}_i, \mathbf{\Omega}_i, \mathbf{r}_i), \\ \lambda &= F(m_i, n_i, h, \mathbf{R}_i, \mathbf{p}_i, \mathbf{\Omega}_i, \mathbf{r}_i), \\ m_i &= \Phi^{-1}(\varphi, \lambda, h, \mathbf{R}_i, \mathbf{p}_i, \mathbf{\Omega}_i, \mathbf{r}_i), \\ n_i &= F^{-1}(\varphi, \lambda, h, \mathbf{R}_i, \mathbf{p}_i, \mathbf{\Omega}_i, \mathbf{r}_i), \quad i = 1, 2. \end{aligned} \quad (1)$$

В рассматриваемой модели элементы внешнего ориентирования \mathbf{p}_i , $\mathbf{\Omega}_i$, $i = 1, 2$, задающие пространственное и угловое положение камеры, определяются по данным измерительных систем спутника с СКО σ_p и σ_{Ω} . Это означает, что во время съёмки реальное положение визирного луча камеры отличается от идеального. При заданной высоте местности h ошибки σ_p и σ_{Ω} приводят к ошибочному определению плановых координат объектов земной поверхности в геодезической σ_{φ} и σ_{λ} или картографической (метрической) σ_{II} системе координат:

$$\sigma_{II} = \left\{ [R_s \sigma_{\varphi}]^2 + [R_s \sigma_{\lambda} \cos \varphi]^2 \right\}^{1/2}, \quad (2)$$

где R_s – радиус земного эллипсоида, $R_s = 6371$ км; φ – геодезическая широта точки снимка.

Исследования показывают, что для современных КА высокого пространственного разрешения («Ресурс-П», IKONOS, GeoEye1, WorldView) ошибки определения плановых координат σ_{II} находятся в пределах 6-12 м, что вполне соответствует требованиям по точности для карт масштаба 1:25000.

При стереобработке трёхмерные координаты объектов земной поверхности (φ, λ, h) , идентифицированных на снимках I_1 и I_2 , вычисляются путём решения переопределённой системы 4-х уравнений с тремя неизвестными:

$$\begin{cases} m_1 = \Phi^{-1}(\varphi, \lambda, h, \mathbf{R}_1, \mathbf{p}_1, \mathbf{\Omega}_1, \mathbf{r}_1), \\ n_1 = F^{-1}(\varphi, \lambda, h, \mathbf{R}_1, \mathbf{p}_1, \mathbf{\Omega}_1, \mathbf{r}_1), \\ m_2 = \Phi^{-1}(\varphi, \lambda, h, \mathbf{R}_2, \mathbf{p}_2, \mathbf{\Omega}_2, \mathbf{r}_2), \\ n_2 = F^{-1}(\varphi, \lambda, h, \mathbf{R}_2, \mathbf{p}_2, \mathbf{\Omega}_2, \mathbf{r}_2). \end{cases} \quad (3)$$

Нетрудно заметить, что СКО ошибки определения плановых координат объектов будет соответствовать значению, вычисленному по формуле (2). Что касается ошибки определения высоты объектов σ_h , то она дополнительно зависит от угла конвергенции α и связана со значением σ_{II} известным соотношением [5],

$$\sigma_h = \frac{\sigma_{II}}{B/H}, \quad (4)$$

где B – величина стереобазы, определяемая углом конвергенции, H – высота съёмки.

Рис. 1 поясняет физический смысл формулы (4). Идеальное положение визирных лучей камеры представлено пунктирными линиями, а реальное положение визирного луча камеры из точки 2 показано непрерывной линией. Из-за различия углового положения лучей, координаты вершины здания определяются с ошибками σ_{II} и σ_h . При соотношении $B/H \approx 1$ (угол конвергенции $\alpha \approx 60^\circ$) значение $\sigma_h = \sigma_{II}$ и составит величину порядка 6-12 м, что в несколько раз превосходит допустимую ошибку определения высот для карт масштаба 1:25000.

Из сказанного следует важный вывод. Ошибка определения плановых координат объектов σ_{II} слабо изменяется по полю снимка и, как правило, в пределах условного кадра является постоянной величиной (за условный кадр принимается изображение, в котором число строк и столбцов совпадают). Тогда, пренебрегая ошибкой идентификации одноимённых объектов на стереоизображениях, можно сделать заключение о наличии систематической ошибки определения высотных координат объектов земной поверхности.

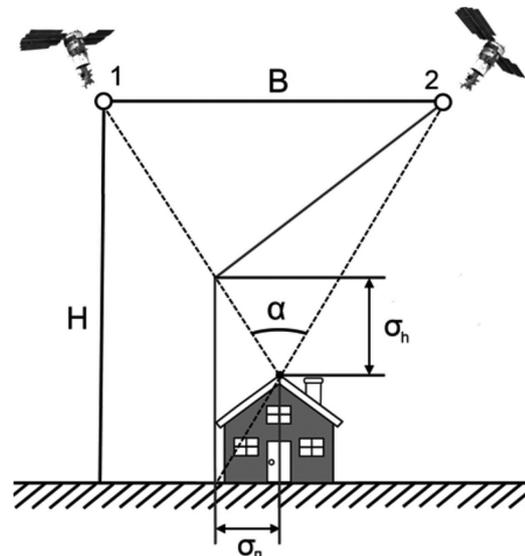
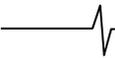


Рис. 1. Схема стереосъёмки земной поверхности

Эксперимент по подтверждению наличия систематических ошибок при определении высот объектов

Для эксперимента КА «Ресурс-П» № 1 была выполнена конвергентная стереосъёмка ($\alpha = 50^\circ$) территории г. Самара, обеспеченной 40 опорными точками с известными геодезическими координатами и высотой $\varphi_0(i)$, $\lambda_0(i)$, $h_0(i)$, $i = \overline{1, 40}$ (маршруты 0041_0102_05164_1_05163_03_10.tif и 0041_0102_05164_1_05163_02_10.tif). С помощью специализированного программного комплекса ССП-ВР была выполнена стереобработка полученных маршрутов съёмки с использованием только измерительной информации. На основе соотношений (3) были вычислены трёхмерные координаты $\varphi(i)$, $\lambda(i)$, $h(i)$ объектов, соответствующих изображениям опорных точек, и рассчитаны разности высот: $\Delta h(i) = h(i) - h_0(i)$, $i = \overline{1, 40}$. Для дальнейшей статистической обработки результатов рассматривалась аддитивная модель оши-



бок, согласно которой разности высот в опорных точках рассматривались в виде суммы систематической δ_h и случайной ε_h ошибок:

$$\Delta h = \delta_h + \varepsilon_h. \quad (5)$$

Среднее значение разности высот, оценка систематической ошибки, вычислялась как:

$$\overline{\delta_h} = \frac{1}{40} \sum_{i=1}^{40} \Delta h(i), \quad (6)$$

а среднеквадратическая ошибка σ_h :

$$\sigma_h = \sqrt{\frac{1}{40} \sum_{i=1}^{40} \Delta h^2(i)}. \quad (7)$$

После исключения систематической ошибки из результатов измерений $\delta_h = \Delta h(i) - \overline{\delta_h}$, оценивались параметры случайной составляющей как стандартной среднеквадратической ошибки:

$$\varepsilon_h = \sqrt{\frac{1}{39} \sum_{i=1}^{40} \delta_h^2(i)}. \quad (8)$$

Результаты расчётов следующие: $\overline{\delta_h} = 9,01$ м, $\sigma_h = 9,13$ м, $\varepsilon_h = 1,4$ м. Малое значение случайной ошибки ε_h и близкие значения σ_h и $\overline{\delta_h}$ подтверждают вывод о наличии систематической ошибки в вычислении координат высот объектов. Данное заключение согласовывается с исследованиями точности ЦМР, созданных по стереопарам китайского спутника ТН-1 [6].

Алгоритм компенсации систематических ошибок расчёта высоты объектов по данным лазерного дальномера

Устранить систематические ошибки в определении высот можно, если, зная точное значение высоты h_0 в одной или нескольких точках стереопары, вычислить поправочный коэффициент Δh , который затем учесть в расчетах. Получить точное значение высоты можно с использованием лазерного дальномера, которым оснащается КА [1]. Как отмечается в публикациях, лазерный дальномер облучает на земной поверхности область Θ диаметром порядка 60-70 м, содержащую осреднённую информацию о всех находящихся в ней высотных объектах. При этом расстояния между соседними отсчётами на несколько порядков превышают пространственное разрешение стереоснимков. Понятно, что подобные измерения весьма грубы и не могут непосредственно использоваться для вычисления поправочного коэффициента и формирования высокоточной карты высот наблюдаемой территории.

Для обеспечения возможности использования измерений лазерного дальномера (ЛД) по стереопаре сформируем карту высот местности $h(\varphi_i, \lambda_j)$ с шагом $(\Delta\varphi, \Delta\lambda)$, $\varphi_i = \varphi_{i-1} + \Delta\varphi$, $\lambda_j = \lambda_{j-1} + \Delta\lambda$. Затем рассчитаем среднее значение высоты $\overline{h_\Theta}$, соответствующей области Θ . В этом случае значение $\overline{h_\Theta}$ будет соответствовать значению высоты h_L , которую измеряет ЛД. Отсюда поправочный коэффициент $\Delta h = \overline{h_\Theta} - h_L$. С его

учётом уточнённая карта высот $h^*(\varphi_i, \lambda_j)$ будет сформирована по правилу $h^*(\varphi_i, \lambda_j) = h(\varphi_i, \lambda_j) + \Delta h$.

Предложенный алгоритм определения поправочного коэффициента основан на модели функционирования ЛД. Для её построения введём следующие обозначения: переменной S обозначим наклонную дальность, измеренную ЛД; \mathbf{R}_L , $\mathbf{\Omega}_L$ – матрицами установочные углы и угловые элементы внешнего ориентирования, а γ – угловое поле зрения ЛД. Тогда, по аналогии с моделью функционирования камеры [4], запишем уравнение для вычисления гринвичских координат центральной точки области Θ ,

$$\mathbf{p}_r(t) = \mathbf{p}(t) + S(t)\mathbf{R}_r(t)\mathbf{\Omega}_L\mathbf{R}_L\mathbf{r}_L, \quad (9)$$

где $\mathbf{p}_r(t) = [X(t), Y(t), Z(t)]^T$ – вектор гринвичских координат точки на земной поверхности, t – время формирования измерения ЛД, $\mathbf{R}_r(t)$ – матрица перехода от связанной системы координат КА к гринвичской,

$\mathbf{r}_L = [0, 0, 1]^T$. С помощью известных соотношений по трёхмерным координатам точки $\mathbf{p}_r(t)$ рассчитаем геодезические координаты центра области Θ , а затем, зная угловое поле зрения ЛД, нетрудно вычислить граничные значения $[\varphi_{\min}(t), \lambda_{\min}(t)]$, $[\varphi_{\max}(t), \lambda_{\max}(t)]$ области Θ . Значение $\overline{h_\Theta}$, соответствующее текущему измерению ЛД, вычислим на основе карт высот $h(\varphi_i, \lambda_j)$,

$$\overline{h_\Theta} = \frac{1}{I_\varphi J_\lambda} \sum_{i=1}^{I_\varphi} \sum_{j=1}^{J_\lambda} h(\varphi_i, \lambda_j), \quad (10)$$

$$I_\varphi = (\varphi_{\max}(t) - \varphi_{\min}(t)) / \Delta\varphi, J_\lambda = (\lambda_{\max}(t) - \lambda_{\min}(t)) / \Delta\lambda.$$

На основе анализа уравнения (9) получим априорную оценку измеренной ЛД высоты h_L . Так, при высокоточном (доли метра) измерении наклонной дальности S высота местности будет определяться с погрешностью измерения высоты КА. Как показали исследования [4] СКО измерения высоты КА приёмником ГЛОНАСС/GPS после наземной обработки составляет 2-3 м. Соответственно, с такой же точностью будет определяться поправочный коэффициент Δh . Таким образом, если бы при стереосъёмке Самарского полигона использовались измерения ЛД, то СКО определения высоты в опорных точках приняло значение $\sigma_h \approx 3,4$ м, что вполне удовлетворило бы требованиям масштаба 1:25000.

Формула метода высокоточного картографирования по данным стереосъёмки и измерениям ЛД

Для высокоточного картографирования земной поверхности КА помимо съёмочной аппаратуры, представленной одной или двумя камерами, должен оснащаться ЛД, формирующим измерения в поле зрения камеры наблюдения. С помощью съёмочной аппаратуры выполняется стереосъёмка требуемой территории, в результате которой формируются два стереоизображения $I_1(m_1, n_1)$, $I_2(m_2, n_2)$ и измерения лазерного дальномера $S(t)$, рис. 2. С использованием уравнений (3) формирует-

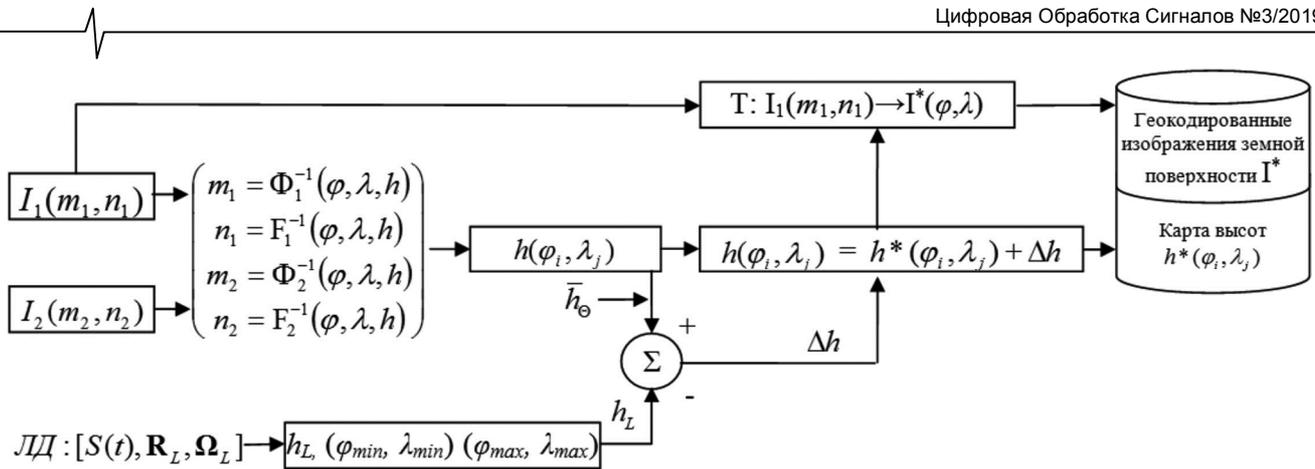


Рис. 2. Схема метода высокоточного картографирования

ся карта высот местности $h(\varphi_i, \lambda_j)$, а на основе формулы (9) вычисляются геодезические координаты области облучения земной поверхности дальномером Θ . По карте высот $h(\varphi_i, \lambda_j)$, соответствующей области Θ , вычисляется поправочный коэффициент Δh , компенсирующий систематические ошибки в расчётах высоты, на основе которого формируется уточнённый массив высот $h^*(\varphi_i, \lambda_j)$ картографируемой территории. С учётом уточнённой цифровой модели местности $h^*(\varphi_i, \lambda_j)$ и обратных уравнений координатного соответствия (1) выполняется ортотрансформирование одного из снимков стереопары в геодезическую или картографическую систему координат. Тем самым формируется геокодированное изображение земной поверхности, для которого минимизированы ошибки определения плановых координат объектов за счёт использования высокоточной цифровой модели местности $h^*(\varphi_i, \lambda_j)$.

Заключение

На основе рассмотренного метода будут выполнены доработки программного обеспечения стереообработки изображений высокого разрешения от планируемого к запуску КА «Аист-2Т» и других. Поскольку в отечественной практике спутников, оснащённых ЛД нет, то отработка метода будет выполняться на натурных данных от перспективных КА. При этом многое будет зависеть от точности работы ЛД и его установки на спутнике. В слу-

чае положительных результатов натурных испытаний для топографов будет предоставлена информация для создания востребованных на практике карт масштаба 1:25000.

Литература

1. Кириллин А.Н., Ахметов Р.Н., Салмин В.В. и др. Формирование на базе платформы «Аист-2» проектного облика малого космического аппарата обзорного наблюдения, функционирующего в составе орбитальной группировки: С. 32-35 / Системы наблюдения, мониторинга и дистанционного зондирования Земли. Материалы XV научно-технической конференции (респ. Крым, г. Алушта, 16-21 сентября 2018 г.). Калуга: Манускрипт, 2018. – 368 с.
2. Лобанов А.Н. Фотограмметрия – М., Недра, 1984, 552 с.
3. Назаров А.С. Фотограмметрия: пособия для студентов вузов – Минск: TerraСистемс, 2010, 400 с.
4. Ахметов Р.Н., Еремеев В.В., Кузнецов А.Е., Мятов Г.Н., Пошехонов В.И., Стратилатов Н.Р. Высокоточная геодезическая привязка изображений земной поверхности от КА «Ресурс-П» // Исследование Земли из космоса, №1, 2017, с. 44-53.
5. Dowman I., Jacobsen K., Konecny G., Sandau R. High Resolution Optical Satellite Imagery. Whittles Publishing, 2011. 230 p.
6. Оньков И.В. Оценка точности ЦМР, созданных по стереопарам триплета КА ТН-1 в программном комплексе ENVI // Геоматика. – 2014. – № 3. с. 22-27.