

УДК 528.8

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ СПОСОБА ИЗМЕРЕНИЯ ВЫСОТ ЗДАНИЙ ПО ОДИНОЧНОМУ СПУТНИКОВОМУ ИЗОБРАЖЕНИЮ

В. Погорелов, В. Шавук

ФГУП “Северо-Кавказское аэрогеодезическое предприятие”

Ключевые слова: спутниковые снимки, измерение высоты здания.

При планировании современного развития городских территорий очень часто требуется информация о высотах зданий. Определяющим фактором является требование компаний сотовой связи, согласно которому точность высот зданий должна позволять правильно оценивать зоны действия базовых телефонных станций. В дальнейшем на основе этих зон создается общая схема районов доступа мобильного сигнала на территории города и составляется прогноз необходимого частотного ресурса. Точные высоты зданий необходимы, кроме того, телефонным компаниям, устанавливающим на крышах зданий, например, лазерные модемы. Требование телефонных компаний к точности определения высот зданий составляет: $СКО = \pm 1,5 \text{ м}$. Других требований к точности определения высот зданий в нормативных документах топографического назначения [1] для топографических планов городов не содержится.

В настоящее время на практике используются два способа определения высот зданий по изображению одиночного снимка: с помощью подсчета количества этажей, изобразившихся на наклонной стороне здания (рис. 1), и на основе измерения длины тени здания на местности.

Оба способа имеют ограничения по практическому применению и дают примерно одну и ту же приближенную оценку высоты здания, хотя и по разным причинам.

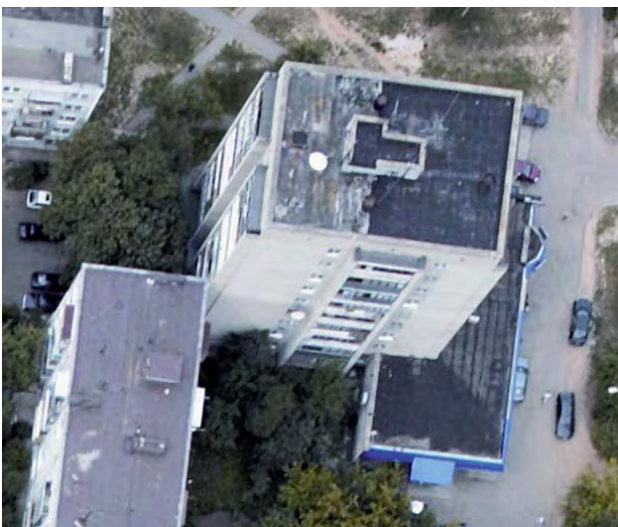
Первый способ неточен из-за отсутствия в строительстве общепризнанного стандарта высот этажей для зданий различного предназначения. При этом, чем выше

здание, тем больше становится накапливаемая величина этой методической ошибки определения его высоты. Этот способ трудно применить при плотной застройке и наличии густой растительности возле дома.

Способ по теням более универсален, но очень трудоемкий. Он неприменим при съемке в пасмурную погоду (рис. 2, а). Он также неточный, поскольку очень трудно правильно идентифицировать границы тени на земной поверхности, особенно при наличии растительности или других строений (рис. 2, б). К тому же в мегаполисах дома стоят близко друг к другу, и конфигурация тени часто принимает причудливые очертания. По имеющимся в литературе источникам и из практического опыта известно, что наилучшая точность указанных способов находится на уровне $СКО = \pm 2 - 3 \text{ мкс}$ в масштабе изображения.



Рис. 1. Определение высоты здания по этажам



а



б

Рис. 2. Ограничения применения способа определения высот зданий по теням: а – съемка в пасмурную погоду; б – затруднено определение четких границ тени

Показательна на эту тему статья, которая содержит теоретическое описание метода и результаты его экспериментальной проверки по изображению космических снимков панорамного типа KVR-1000 [2]. В эксперименте тени домов автоматически идентифицированы программным путем по интенсивности яркости пикселей изображения, после чего определены их длины. Дальнейшие вычисления высот зданий производились по двум схемам.

Одна вычислительная схема использовала отношение соответствующих длин тени и наклонной стороны, определенное по калибровочному зданию:

$$h_1 = \frac{h_2 \cdot s_1}{s_2}, \quad (1)$$

где h_1 – высота определяемого здания, м; s_1 – длина соответствующей тени на изображении, мкм; h_2 – известная высота калибровочного здания, м; s_2 – длина соответствующей тени на изображении, мкм.

Другой метод вычислений базировался на использовании угла α высоты Солнца, определяемого по результатам бортовых измерений времени съемки:

$$h = tg\alpha \cdot s_1. \quad (2)$$

В эксперименте по определениям высот 20 зданий было выполнено сравнение с их высотами, измеренными непосредственно на местности. Соответствующие оценки точности для этих методов получились равными: $CKO = \pm 1,70$ м и $CKO = \pm 1,75$ м соответственно. С учетом отсутствия сведений о рельефе местности общая ошибка определения высот зданий была оценена как: $CKO = \pm 2,5 - 4$ м или, с учетом разрешения снимка KVR-1000, приблизительно 2 пкс. Т.е. выполнения требований сотовых компаний по точности определению высот зданий в этом случае метод по теням не обеспечивает.

В этой работе предложен строгий способ определения высот зданий на основе результатов непосредственного измерения длины видимой стороны здания по изображению, известных значений элемен-

тов внешнего ориентирования (ЭВО) снимка и высот точек местности участка цифровой модели рельефа (ЦМР) в районе измеряемого здания.

При постановке задачи рассмотрим известные зависимости, которые описывают смещение точки на снимке из-за влияния рельефа [3]:

$$\Delta x = \frac{h}{fH\phi} \cdot (c_1x + c_2y - c_3f) \cdot (-f \cdot c_1 - xc_3), \quad (3)$$

$$\Delta y = \frac{h}{fH\phi} \cdot (c_1x + c_2y - c_3f) \cdot (-f \cdot c_2 - xc_3).$$

Поскольку смещение точек сканерного снимка из-за влияния рельефа происходит вдоль его оси сканирования, т.е. обычно вдоль оси y , то решим второе равенство в данных зависимостях относительно h . В результате получим такую формулу:

$$h = -f \frac{H\phi \cdot \Delta y}{(c_1x + c_2y - c_3f) \cdot (fc_2 + xc_3)}, \quad (4)$$

Для общего случая, т.е. при наличии угла θ бокового отклонения направления сканирования, полученная формула (4) принимает вид:

$$h = -f \frac{H\phi \cdot \Delta y \cdot tg\theta}{(c_1x + c_2y - c_3f) \cdot (fc_2 + xc_3)}. \quad (5)$$

Следовательно, для решения задачи в общем случае необходимо знать элементы внутреннего и внешнего ориентирования космического снимка, а также значения пиксельных координат граничных точек измеряемого здания. Строгое теоретическое обоснование этого способа можно реализовать, если использовать особенности работы современных цифровых фотограмметрических систем (ЦФС). На ЦФС в каждый момент времени с дискретностью вычислений ΔT , величина которой обуславливается быстродействием процессора используемого компьютера, решаются два строгих уравнения связи пиксельных координат точки снимка и геодезических координат соответствующей точки местности. Для космических изображений сканерного типа эти уравнения имеют вид [4]:

$$x - x_0 = -f \frac{\bar{a}_1(X - X_S - \bar{X}_S) + \bar{b}_1(Y - Y_S - \bar{Y}_S) + \bar{c}_1(Z - Z_S - \bar{Z}_S)}{\bar{a}_3(X - X_S - \bar{X}_S) + \bar{b}_3(Y - Y_S - \bar{Y}_S) + \bar{c}_3(Z - Z_S - \bar{Z}_S)}, \quad (6)$$

$$y - y_0 = -f \frac{\bar{a}_2(X - X_S - \bar{X}_S) + \bar{b}_2(Y - Y_S - \bar{Y}_S) + \bar{c}_2(Z - Z_S - \bar{Z}_S)}{\bar{a}_3(X - X_S - \bar{X}_S) + \bar{b}_3(Y - Y_S - \bar{Y}_S) + \bar{c}_3(Z - Z_S - \bar{Z}_S)}.$$

Принимая во внимание возможности современных компьютеров, можно с большой долей достоверности утверждать, что вычисления на них производятся в реальном времени. Следовательно, на основе результатов решения уравнений (6) практически для каждой точки сканерного снимка можно установить однозначное соответствие между входными значениями геодезических координат X_i, Y_i, Z_i точек местности и вычисляемыми величинами пиксельных координат x_i, y_i их изображений:

$$X_i, Y_i, Z_i \Rightarrow x_i, y_i, \quad (7)$$

В рассматриваемой нами задаче для каждого измеряемого здания мы имеем дело с двумя точками:

подножием здания и его карнизом. Для точки подножия здания известны все параметры уравнений (6), поскольку ее геодезическая высота Z_1 определяется из ЦМР в районе здания по исходным плановым геодезическим координатам X_1, Y_1 . Т.е. задача определения высоты здания по одиночному космическому снимку на ЦФС сводится к измерению пиксельных координат x_2, y_2 точки карниза здания (рис. 3) и последующему решению системы из двух уравнений вида (6) с одним неизвестным – Z_2 .

$$\begin{cases} x_2 = f(X, Y, Z)_2 \\ y_2 = f(X, Y, Z)_2 \end{cases}, \quad (8)$$

Другими словами, необхідно решить прямую фотограмметрическую засечку для точки 2 – карниза здания. Разность значений аппликат Z точек подножия и карниза здания дает его искомую высоту:

$$h = Z_2 - Z_1, \quad (9)$$

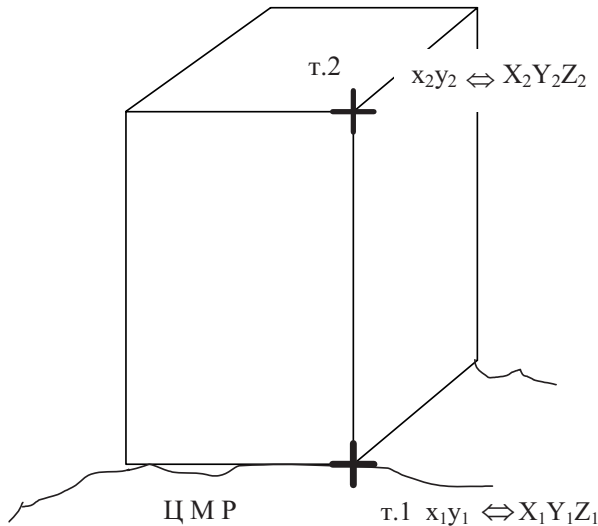


Рис. 3. Измерение длины наклонной стороны здания из уравнений вида (6) с одним неизвестным – Z_2 .

Алгоритм решения этой задачи состоит из таких операций.

1. Выполняется внешнее ориентирование снимка по измерениям координат опорных точек и загрузка ЦМР на участок местности в районе измеряемого здания. В ЦМР определяется значение высоты точки местности Z_1 для подножия здания по ее плановым координатам X_1, Y_1 .

2. На основе решения уравнений вида (6) для точки подножия здания устанавливается однозначное соответствие координат точки на снимке и местности. При этом курсор наводится по изображению на т.1 подножия здания.

3. Оператор, не меняя значений плановых координат, постепенно изменяет значение аппликаты Z_1 , увеличивая ее. Поскольку точка на снимке из-за влияния рельефа смещается вдоль направления к точке надира, то курсор начнет двигаться на изображении вверх по ребру видимой стороны здания до тех пор, пока он не будет наведен на карниз здания. В этот момент времени на основе решения уравнений вида (6) будет установлено аналогичное соответствие координат для угла крыши здания на снимке и местности. В результате становится известным значение высоты Z_2 .

4. Решается конечное уравнение (9):

$$h = Z_2 - Z_1.$$

Этот алгоритм реализован в 2006 г. в программном обеспечении ЦФС Ortho/Neva в виде специальной утилиты и используется при выполнении картографических проектов на территорию городов, где требуется определение высот зданий.

Следует заметить, что год спустя в работе [5] был описан аналогичный способ определения высот объектов местности, который предполагает использование в качестве уравнений связи координат не строгие зависимости вида (6), а RPC-полиномы. Кроме того, для упрощения решения в нем используются не высоты точек ЦМР, а высота средней плоскости. Поэтому, как показали производственные испытания, точность этого метода соответствует точности работы RPC-полиномов без учета систематической погрешности: $CKO = \pm 3 - 8$ мкс.

Практическая проверка предложенного строгого способа проводилась путем определения высот (h)_{*i*} 16 тестовых зданий г. Пятигорска по их изображению на снимке QuickBird и сравнения их с данными h _{*i*} наземных измерений (см. таблицу).

Номер здания	$\Delta h = (h) - h$	Номер здания	$\Delta h = (h) - h$	Номер здания	$\Delta h = (h) - h$	Номер здания	$\Delta h = (h) - h$
1	-0.4	5	+0.6	9	+0.5	13	-0.6
2	-0.8	6	+0.4	10	-0.5	14	-0.7
3	+0.3	7	+0.7	11	-0.4	15	+0.8
4	-0.7	8	-0.3	12	+0.4	16	-0.5

Средняя квадратическая ошибка составила $CKO = \pm 0,60$ м.

Полученные результаты сравнения вычисленных и тестовых высот h показывают, что точность предложенного метода зависит от точности определения ЭВО сканерного снимка и точности наведения курсора на контур здания. Причем при использовании в качестве опорных GPS-точек величина последней ошибки преобладает. В целом, по результатам эксперимента точность определения зданий колебалась в пределах 0,3–0,8 м.

На основании сказанного можно сделать обобщающий вывод. С учетом результатов выполненного в Северо-Кавказском АГП эксперимента можно утверждать, что точность предложенного метода определения высот зданий по одиночному космическому снимку сканерного типа составляет порядка 0,5 – 1,2 пикселей в масштабе обрабатываемого изображения. Это в два раза выше точности известного способа определения высот зданий по теням или этажам и в четыре раза выше способа определения высот с использованием RPC-полиномов.

Предложенный способ более универсален. Он не может применяться только для снимков, снятых в надир.

Литература

1. Основные положения по созданию и обновлению топографических карт масштабов 1:10000, 1:25000, 1:50000, 1:100000, 1:200000, 1:500000, 1:1000000. М.: РИО ВТС, 1984. – 51 с.
2. Byung-Hwan Lee, Jeong-Hee Kim, Byung-Hwan Park. Определение высот зданий по одиночному снимку // The Journal of GIS Association of Korea. – Vol. 7. – № 1, April 1999. – P. 89–101.

3. Чекалин В.Ф. Ортотрансформирование фотоснимков / В.Ф. Чекалин. – М.: Изд. Недра, 1986. – 88 с.
2. Chekalin V., Fomtchenko M.. Russian concept of the space images digital processing // 19th ISPRS Congress, Vol. XXXIII, Amsterdam, 2000.
3. Беленов А.В. Определение высот объектов по одиночным космическим снимкам Ikonos и QuickBird / А.В. Беленов, М.В. Лютивинская // Геопрофи, 2007. – № 4. – 15 с.

Теоретическое обоснование способа измерения высот зданий по одиночному спутниковому изображению
В. Погорелов, В. Шавук

Теоретически обосновано и приведено способ измерения высот зданий по одиночному спутниковому изображению.

Теоретичне обґрунтування способу вимірювання висот будівель за поодиноким супутниковим зображенням
В. Погорелов, В. Шавук

Теоретично обґрунтовано та наведено спосіб вимірювання висот будівель за поодиноким супутниковим зображенням.

Theoretical grounding of the method for altitude determination of the buildings using satellite images
V. Pogorelov, V. Shavuk

In the article is theoretically grounded and described the method for altitude determination of the buildings using satellite images.



Видавництво Львівської політехніки пропонує

**Дорожинський О. Л., Тукай Р.
ФОТОГРАМЕТРІЯ**

*Підручник. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2008. 332 с.
Формат 170 x 240 мм. Тверда обкладинка.
ISBN 978-966-553-688-8*

Затвердило Міністерство освіти і науки України

Подано теорію аналітичної фотограмметрії та розв'язання основних фотограмметричних задач, що становить основу цифрової фотограмметрії. Висвітлено питання цифрового оброблення зображень, зокрема формування образів, поліпшення якості, способи стиснення та ін. Детально описано технології цифрової фотограмметрії, зокрема побудову цифрових моделей рельєфу і поверхні, аеротріангуляції, кореляції зображень, створення ортофотокарт. Подано теоретичне розв'язання задач космічної фотограмметрії, розглянуто сучасні підходи до технологій космічного картографування поверхонь Землі і планет.

Підручник призначений для студентів ВНЗ базового та магістерського рівнів підготовки напряму "Геодезія, картографія та землевпорядкування", а також для аспірантів, докторантів та фахівців, що займаються використанням фотограмметрії та дистанційного зондування у різних галузях науки і практики.

ЗМІСТ

Від авторів.

1. Вступ.
 2. Теоретичні основи фотограмметрії.
 3. Комп'ютерне опрацювання цифрових зображень.
 4. Цифровий фотограмметричний знімок.
 5. Побудова цифрових моделей об'єктів.
 6. Аналітична фототріангуляція.
 7. Технології цифрової фотограмметрії.
 8. Космічна фотограмметрія.
- Список літератури.
Алфавітний покажчик.*

ПРО АВТОРІВ

Олександр ДОРОЖИНСЬКИЙ
професор кафедри фотограмметрії та геоінформатики Національного університету «Львівська політехніка»

Ришард ТУКАЙ –
керівник підприємства
Tukaj Mapping Central Europe у Польщі

**Книги можна замовити за адресою: вул. Ф. Колесси, 2, корп. 23А, м. Львів, 79000
тел. +38032 2582146, факс +38032 2582136, ел. пошта: vmr@vlp.com.ua, http://vlp.com.ua**