

УДК 528

## ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ СПОСОБА ИЗМЕРЕНИЯ ВЫСОТ ЗДАНИЙ ПО ОДИНОЧНОМУ СПУТНИКОВОМУ ИЗОБРАЖЕНИЮ

**В. Погорелов, В. Шавук**

АО “Северо-Кавказское аэрогеодезическое предприятие”

При планировании современного развития городских территорий очень часто требуется информация о высотах зданий. При этом 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:  $СКО = \pm 1,5$  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: путем подсчета количества этажей, изобразившихся на наклонной стороне здания (рис. 1), и на основе измерения длины тени здания на местности.



Рис. 1. Определение высоты здания по этажам

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. Чем выше здание, тем больше становится накапливаемая величина этой методической ошибки определения его высоты. Этот способ трудно применять 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), а также неточен, 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 расположены 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 – на уровне  $СКО = \pm 2 - 3$  пкс в масштабе изображения.



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 были 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  $\alpha$  высоты Солнца, определяемого по результатам бортовых измерений времени съемки:

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

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, то есть выполнение требований сотовых компаний по точности определения высот зданий в этом случае метод по теням не обеспечивает.

В настоящей работе предложен строгий способ определения высот зданий на основе результатов непосредственного измерения длины видимой стороны здания по изображению, известных значений элементов 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 этих 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  $\theta$  бокового отклонения направления сканирования, полученная формула (4) принимает вид:

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

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  $\Delta T$ , 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 может быть установлено 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  $X_1, Y_1$ . То есть 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, необходимо решить прямую фотограмметрическую засечку для точки 2 – карниза здания. Разность значений аппликат  $Z$  точек подножия и карниза здания дает его искомую высоту:

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

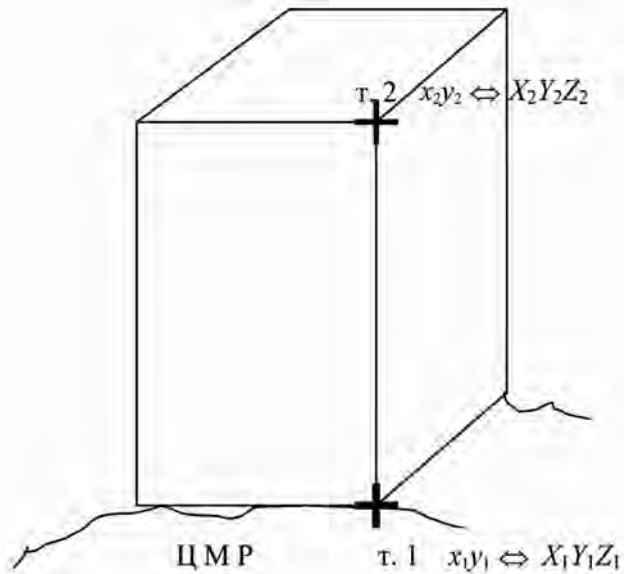


Рис. 3. Измерение длины наклонной стороны здания из уравнений вида (6) с одним неизвестным –  $Z_2$

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 мест-

ности. Курсор наводится по изображению на т. 1 подножия здания.

3. Оператор, не меняя значений плановых координат, постепенно изменяет значение аппликаты  $Z_1$  в сторону ее увеличения. Поскольку смещение точки на снимке из-за влияния рельефа происходит вдоль направления к точке надира, то курсор начнет двигаться на изображении вверх по ребру видимой стороны здания до тех пор, пока 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):

$$h = Z_2 - Z_1.$$

Следует заметить, что в работе [5] 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:  $СКО = \pm 3 - 8$  пкс.

Практическая проверка предложенного строгого способа осуществлена путем определения высот ( $h$ ); 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  $СКО = \pm 0,60$  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 этого эксперимента точность определения зданий колебалась в пределах 0,3–0,8 м.

На основании сказанного можно сделать обобщающий вывод. С учетом результатов проведенного 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 точности способа определения высот с использованием RPC-полиномов.

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

#### 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.
2. Byung-Hwan Lee. Определение высот зданий по одиночному снимку / Byung-Hwan Lee, Jeong-Hee Kim, Byung-Hwan Park // The Journal of GIS Association of Korea. – April 1999. – Vol. 7. – № 1. P. 89–101.

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

**Теоретичне обґрунтування способу вимірювання висот будинків за одиничним супутниковим зображенням**  
В. Погорелов, В. Шавук

Розглянуто теоретичне обґрунтування способу вимірювання висот будівель за одиничним супутниковим зображенням.

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

Рассмотрено теоретическое обоснование способа измерения высот зданий по одиночному спутниковому зображенню

**Theoretical substantiation of method for measuring the height of buildings on the basis of single satellite images**  
V. Pogorelov, V. Shavuk

The article deals of theoretical substantiation of method for measuring the height of buildings on the basis of single satellite images.


## Veni, vidi, vici Прийшов, побачив, переміг

- теоретичні і практичні положення військової топографії
- карти армій інших держав
- супутникові та автономні системи навігації наземних рухомих об'єктів, нових вітчизняних програмних продуктів
- застосування цифрових та електронних карт

*Для курсантів (слухачів) вищих військових навчальних закладів Міністерства оборони України та для самостійної підготовки офіцерів Збройних сил України.*

**За ред. П. П. Ткачука та І. С. Тревого.**  
**Підручник.**  
Видавництво Львівської політехніки, 2011. 416 с.  
ISBN 978-617-607-026-9





- сучасні оптичні та цифрові електронні геодезичні прилади
- основи будови, перевірка, дослідження та технологія роботи оптичними і електронними геодезичними приладами
- створення криволінійних сполучень доріг
- геодезичні методи забезпечення вишукування і будівництва мостових переходів та транспортних тунелів

**І. С. Тревого.**  
**ІНЖЕНЕРНО-ГЕОДЕЗИЧНІ РОБОТИ В МОСТОВОМУ І ТУНЕЛЬОБУДУВАННІ**  
Конспект лекцій для студентів спеціальності «Мости і транспортні тунелі».  
Видавництво Львівської політехніки, 2015. 120 с.

