

УДК 528.7

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ФОРМУЛ ИСКАЖЕНИЙ ЗА РЕЛЬЕФ НА СКАНЕРНЫХ СНИМКАХ

канд. техн. наук, доц. А.А. МИХЕЕВА, А.А. ЖУК
(Полоцкий государственный университет)

Рассмотрены формулы расчета искажений планового положения точек местности. Даны рекомендации по выбору формулы для расчета. Предложена формула, позволяющая рассчитать допустимые превышения точек местности относительно средней плоскости заснятой на снимке территории, меньше которых не требуется цифровой модели рельефа. Выполнен расчет допустимых превышений для некоторых спутников.

При обновлении карт и планов на производстве наиболее часто используют сканерные снимки, полученные из космоса, при обработке которых в литературных источниках, однако, встречаются противоречивые сведения о необходимости создания цифровой модели рельефа (ЦМР) снимков. Создание ЦМР – трудоемкий процесс, требующий привлечения сторонних данных. Значительно проще выполнить только аффинные преобразования, не привлекая ЦМР.

В настоящее время для картографирования широко используются сканерные снимки, полученные оптико-электронными сканерами из космоса. Некоторые характеристики спутников, имеющих такие сканеры, приведены в таблице 1 [1 – 10].

Таблица 1

Характеристики спутников и сканерных систем

Носитель	Съемочная система	Страна	Год запуска	Разрешение, м (в панхром.)	Максимальное отклонение от надира, град	Высота съемки, км	Охват ширины полосы обзора D, км	Угол поля зрения 2β, град	Фокусное расстояние f, м
EROS-A	PAN	Израиль	2000	1,8	±45	480	14	–	3,45
IKONOS-2	PAN	США	1999	0,8	±45	680	11	0,9	10,0
QUICK Bird	–	США	2001	0,6	±30	450	16,5	–	8,8
OrbView-3	OHRIS	США	2003	1	±50	470	8	1	3,0
IRS-P5	Cartosat-1	Индия	2005	2,5	–	618	30	–	2,0
ALOS	PRISM	Япония	2006	2,5	±24	690	35	–	2,0
WorldView-1	–	США	2007	0,5	±40	450	16,4	–	8,8
IRS-1	PAN	Индия	1997	5,8	–	820	70	–	–

Прочерки в таблице указывают на отсутствие сведений.

В литературных источниках [1; 2; 11; 12] приведены разные формулы для оценки искажений за рельеф, которые приведут к ошибкам в определении координат точек местности.

Автор работы [1] П.С. Титаров предлагает следующую формулу для определения ошибки планового положения точки местности Δ_h , вызванную отклонением высоты этой точки от среднего значения отметок h на сканерном снимке:

$$\Delta_h = h \cdot \operatorname{tg} \alpha, \quad (1)$$

где α – угол между отвесной линией и оптической осью.

По мнению ученого [1], снимки со спутника *QuickBird*, полученные при углах $\alpha < 15^\circ$, наиболее пригодны для фотограмметрической обработки, в то время как максимальное значение этого угла достигает 25° , а в случае IKONOS оно еще больше. В работе [1] П.С. Титаров приводит расчет величины погрешности Δ_h в метрах для спутника IKONOS-2, который представлен в таблице 2.

Таблица 2

Погрешность определения планового положения точек местности по снимку (в метрах)

Угол отклонения от надира, α	Отклонение высоты точек местности от среднего значения h , м				
	2 м	10 м	50 м	100 м	500 м
5°	0	1	1	9	11
15°	0,5	3	13	27	134
25°	1	5	23	47	233

Автор работы [2] А.С. Назаров предлагает следующее решение оценки искажений за рельеф на сканерных снимках:

$$\Delta_h = \frac{H \cdot \operatorname{tg} \alpha + D/2}{H} h = (\operatorname{tg} \alpha + 0,5D/H)h, \quad (2)$$

где D – ширина полосы обзора; H – высота спутника.

В работах [1; 2] говорится, что из-за того, что геометрия сканерных снимков отличается от геометрии кадровых снимков, формулы традиционной фотограмметрии применить нельзя. Мы не согласны с этим утверждением, так как вдоль по линейке ПЗС – центральная проекция.

Рассмотрим возможность применения формулы традиционной фотограмметрии, которая представлена в работах [11; 12] и имеет вид:

$$\delta_h = \frac{rh}{H} \frac{\left(1 - \frac{r}{2f} \sin 2\alpha \sin \varphi\right)}{\left(1 - \frac{rh}{2Hf} \sin 2\alpha \sin \varphi\right)}, \quad (3)$$

где φ – полярный угол (угол между надирной горизонталью и направлением на точку); r – радиус-вектор (расстояние от точки надир до текущей точки); δ_h – смещение точки аэроснимка из-за влияния рельефа; H – высота фотографирования; h – превышение; f – фокусное расстояние.

Формула (3) выражает величину смещения точки из-за рельефа местности на снимке [3].

При $r = 0$ $\delta_h = 0$, т.е. рельеф не вызывает смещения точки, совпадающей с точкой надир.

При $\alpha = 0$ формула (3) имеет следующий вид [11; 12]:

$$\delta_h = \frac{rh}{H}. \quad (4)$$

На горизонтальном аэроснимке смещения точек прямо пропорциональны их расстояниям от главной точки (так как на горизонтальном аэроснимке точка надир совпадает с главной точкой), превышению точек местности относительно начальной плоскости и обратно пропорциональны высоте фотографирования [11; 12].

Выполним оценку искажений за рельеф на сканерных снимках по трем рассмотренным формулам.

Примем значения α , как предложено в работе [1], т.е. 5, 15 и 25°, добавив 0°, значения превышений примем теми же, добавив 250 м. Произведем оценку искажений за рельеф, используя формулу (1).

Пересчитаем искажения Δ_h , приведенные в таблице 2 до десятых долей метра для спутника IKONOS-2. Полученные результаты представлены в таблице 3.

Таблица 3

Погрешность определения планового положения точек местности по снимку с использованием формулы (1)

Угол отклонения от надир, α	Отклонение высоты местности от среднего значения h , м					
	2 м	10 м	50 м	100 м	250 м	500 м
0°	0	0	0	0	0	0
5°	0,1	0,8	4,4	8,7	21,8	43,7
15°	0,5	2,7	13,4	26,8	66,9	133,9
25°	0,9	4,6	23,3	46,6	116,6	233,1

Сопоставив результаты расчетов таблиц 2 и 3, видим, что в таблице 2 имеются опечатки или же ошибки в расчетах. Кроме того, как видим, при $\alpha = 0^\circ$ все искажения при любых превышениях равны нулю. Это говорит о том, что в работе [1] учтены искажения только для главной точки снимка, а при угле $\alpha = 0^\circ$ главная точка, как говорилось выше, и точка надир совпадают. Именно в точке надир, как свидетельствует формула (4), искажения за рельеф равны нулю.

Исходя из формулы (1) можно сказать, что результаты расчетов для любых сканерных систем (например, расположенных на спутниках *Quick Bird*, *OrbView-3*, *EROS-A* и других) будут такими же, как и для *IKONOS-2*, так как формула (1) учитывает лишь отклонение высоты местности от среднего значения и угол отклонения от надир α , т.е. параметры, не зависящие от самого спутника. Поэтому нет необходимости проводить дальнейшие расчеты по формуле (1) для других спутников.

Выполним расчет погрешностей определения планового положения точек из-за рельефа местности на сканерных снимках Δ_h с применением формулы (2) для спутника *IKONOS-2*, используя его данные: охват местности $D = 11$ км, высоту съемки $H = 680$ км, приняв те же углы отклонения от надира α и отклонения высоты местности от средней отметки h . Расчеты приведем в таблице 4.

Таблица 4

Погрешность определения планового положения точек местности по снимку с использованием формулы (2) для спутника *IKONOS-2* (в метрах)

Угол отклонения от надира, α	Отклонение высоты местности от среднего значения h , м					
	2 м	10 м	50 м	100 м	250 м	500 м
0°	0,0	0,0	0,4	0,8	2,0	4,0
5°	0,1	0,9	4,7	9,5	23,8	47,7
15°	0,5	2,7	13,8	27,6	69,0	138,0
25°	0,9	4,7	23,7	47,4	118,5	237,1

Сопоставляя данные таблиц 3 и 4, следует отметить, что автор работы [2] учел искажения на краях снимка. Возможно, автор работы [1] решил, что ПЗС-линейка мала и искажения на краю линейки мало что изменят. Однако из сопоставления таблиц 3 и 4 также видно, что погрешность определения планового положения для спутника *IKONOS-2* может достигать четырех метров.

Для сравнения определим погрешность планового положения точек местности с использованием формулы (2) для спутника *Quick Bird*. Его исходные данные: $D = 16,5$ км, $H = 450$ км. Результаты представим в таблице 5.

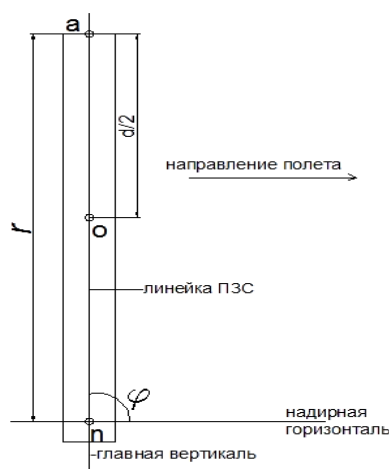
Таблица 5

Погрешность определения планового положения точек местности по снимку с использованием формулы (2) для спутника *Quick Bird* (в метрах)

Угол отклонения от надира, α	Отклонение высоты местности от среднего значения h , м					
	2 м	10 м	50 м	100 м	250 м	500 м
0°	0,0	0,1	0,9	1,8	4,5	9,1
5°	0,2	1,0	5,2	10,5	26,4	52,9
15°	0,5	2,8	14,3	28,6	71,5	143,1
25°	0,9	4,8	24,2	48,4	121,1	242,3

Сопоставляя данные таблиц 4 и 5, можно заключить, что параметры съемочной системы оказывают влияние на искажения, вызванные рельефом местности, и пренебрегать ими нельзя.

Прежде чем выполнить оценку искажений за рельеф на сканерных снимках с использованием формулы традиционной фотограмметрии [11; 12], необходимо определить радиус-вектор r и полярный угол φ . Для упрощения вычислений предположим, что оптическая ось отклонена от надира перпендикулярно направлению полета. В этом случае угол $\varphi = 90^\circ$, и расположение точек будет, как показано на рисунке 1.



Определение радиус-вектора и полярного угла

a – изображение точки местности (выберем точку на краю ПЗС-линейки); o – главная точка строки;
 n – точка надира; r – радиус-вектор; $d/2$ – половина размера линейки ПЗС

На основании рисунка радиус-вектор можно рассчитать по формуле:

$$R = na = on + oa = f \operatorname{tg} \alpha + \frac{d}{2}, \quad (5)$$

где $on = f \operatorname{tg} \alpha$ [12]; $d = \frac{D}{m}$ – знаменатель масштаба фотографирования m вычисляется по известной формуле из источника [12]:

$$m = \frac{H}{f}. \quad (6)$$

Значения высот полетов спутников H и фокусных расстояний f съемочных систем приведены в таблице 1.

Значение радиус-вектора r для каждого спутника будет свое. Выполним расчет r для спутника *IKONOS-2*. Результаты расчетов представим в таблице 6.

Таблица 6

Расчет величины радиус-вектора r для спутников *IKONOS-2*

$\alpha, ^\circ$	$0, ^\circ$	$5, ^\circ$	$15, ^\circ$	$25, ^\circ$
спутник <i>IKONOS-2</i> ; $f = 10000$ мм; $D = 11$ км; $H = 680$ км				
$r, \text{ мм}$	81,1	955,9	2760,5	4744,1

Для спутника *IKONOS-2* исходными данными будут: фокусное расстояние $f = 10000$ мм; высота съемки $H = 680$ км; полярный угол $\varphi = 90^\circ$; радиус-вектора r , рассчитанные и представленные в таблице 6, а также величины α и h , значения которых были приняты ранее. Результаты расчетов даны в миллиметрах и представлены в таблице 7.

Таблица 7

Искажения на сканерном снимке за рельеф точек местности с использованием формулы традиционной фотограмметрии для спутника *IKONOS-2* (в мм)

Угол отклонения от надира α /радиус-вектор $r, \text{ мм}$	Отклонение высоты местности от средней отметки $h, \text{ м}$					
	2 м	10 м	50 м	100 м	250 м	500 м
0°/81,1	0,000238	0,00119	0,00596	0,0119	0,0298	0,0596
5°/955,9	0,00278	0,0139	0,0697	0,139	0,349	0,697
15°/2760,5	0,00756	0,0381	0,199	0,381	0,969	1,99
25°/4744,1	0,0114	0,0586	0,329	0,586	1,52	3,29

Так как в таблице 7 получены искажения за рельеф на сканерных снимках, пересчитаем эти значения в погрешности определения планового положения точек местности, используя следующую формулу:

$$\Delta_h = \delta_h \cdot m, \quad (7)$$

где знаменатель масштаба съемки m вычисляется по формуле (6), и для изображений со спутника *IKONOS-2* $m = 68000$.

Результаты расчетов по формуле (7) для спутника *IKONOS-2* приведены в таблице 8.

Таблица 8

Погрешность определения планового положения точек из-за рельефа местности для спутника *IKONOS-2* (в метрах)

Угол отклонения от надира α /радиус-вектор $r, \text{ мм}$	Отклонение высоты местности от средней отметки $h, \text{ м}$					
	2 м	10 м	50 м	100 м	250 м	500 м
0°/81,1	0,0	0,1	0,4	0,8	2,0	4,1
5°/955,9	0,2	0,9	4,7	9,5	23,7	47,4
15°/2760,5	0,5	2,5	13,5	25,9	65,8	135,3
25°/4744,1	0,8	3,9	20,0	39,8	100,0	200,0

Исходя из полученных результатов, можно заключить, что формулой традиционной фотограмметрии (3) можно тоже пользоваться, так как получили похожие, хотя и отличающиеся от расчетов по формулам (1) и (2) результаты, особенно заметные с увеличением отклонения высоты местности от среднего значения. Однако, как видно из формулы (3), для расчета требуется знание таких величин, как расстояния от точки надира до текущей r и фокусное расстояние f , которое приведено в литературе приближен-

но, а для расчета r нужно знать с высокой точностью размер пиксела на линейке ПЗС, который также известен с округлением. Кроме того, расчеты по формуле (3) довольно сложны.

Анализируя полученные результаты, можно заключить, что следует отдавать предпочтение формуле (2), так как в формуле (1) не учитываются искажения, вызванные влиянием рельефа на краях снимка.

Как отмечает автор работы [1], анализируя таблицу 2, при съёмке равнинной местности погрешность определения планового положения контуров по снимку, прошедшему аффинную географическую привязку, может достигать десятков, а при съёмке гор – сотен метров. И отмечает, что выполнение ортотрансформирования с учетом модели рельефа местности практически всегда (за исключением случаев съёмки равнинной местности или использования надирных снимков, предоставление которых поставщики данных не гарантируют) является необходимым условием получения выходных продуктов высокой точности [1]. Однако с этим утверждением нельзя согласиться, так как в формулах расчета погрешностей определения положения точек по снимку имеет место суммарное влияние как рельефа местности, так и угла наклона снимка.

Влияние угла наклона снимка устраняется в ходе трансформирования. Оставшиеся искажения за рельеф рассчитаны в таблицах 4, 5 и 7 при $\alpha = 0^\circ$ и достигают значительных величин при больших превышениях точек местности над средней плоскостью.

Допустимые смещения точек на цифровых ортофотопланах вследствие влияния рельефа не должны превышать 0,3 мм [2; 13; 14]. Исходя из этого требования рассчитаем величины погрешностей планового положения точек на местности Δ_h для карт и планов разных масштабов по формуле:

$$\Delta_h = 0,3M, \quad (8)$$

где M – знаменатель масштаба ортофотоплана.

Результаты расчетов по формуле (8) приведены в таблице 9.

Таблица 9

Расчет величины погрешностей в плановом положении точек

Знаменатель масштаба M фотоплана	Погрешность положения точки (м)
2 000	0,6
5 000	1,5
10 000	3,0
25 000	7,5

Выведем формулу для определения допустимых превышений $h_{\text{доп}}$ на основе формулы (4), умножив левую и правую части этой формулы на знаменатель масштаба съёмки m , в результате получим допустимые искажения планового положения точек местности $\Delta_{h\text{доп}}$:

$$\Delta_{h\text{доп}} = m \frac{r h_{\text{доп}}}{H}, \quad (9)$$

где mr в принятых нами обозначениях будет $\frac{D}{2}$, и формула (9) примет вид:

$$\Delta_{h\text{доп}} = \frac{D h_{\text{доп}}}{2H}. \quad (10)$$

откуда
$$h_{\text{доп}} = \frac{2H \Delta_{h\text{доп}}}{D}. \quad (11)$$

Можно также вывести формулу расчета допустимых превышений на основании формулы (2), приняв $\alpha = 0^\circ$ и решив ее относительно $h_{\text{доп}}$. В результате получим формулу (11).

Расчет допустимых превышений не вызовет проблем, так как входящие в формулу (11) параметры приведены в литературе.

Выполним вычисления допустимых превышений $h_{\text{доп}}$ для обеспечения величин погрешностей определения планового положения, приведенных в таблице 9. Результаты вычислений допустимых превышений между точками на местности для сканерных снимков, полученных со спутников *IKONOS-2*, *QuickBird*, *OrbView-3*, *EROS-A*, приведем в таблице 10, из которой видно, что при создании карт масштаба 1:М...1:25000 превышения точек местности могут быть значительными (более 500 м). С увеличением масштаба ортофотоплана величины превышений точек местности уменьшаются и при создании ортофотоплана масштаба 1:2000 по снимкам, полученным со спутника *QuickBird*, можно не учитывать искажения за рельеф при превышениях точек местности над средней плоскостью не более 41 м на сканерный снимок.

Таблица 10

Определение допустимых значений превышений точек на местности для спутников *IKONOS-2*, *QuickBird*, *OrbView-3*, *EROS-A*

Знаменатель масштаба <i>M</i>	2000	5000	10000	25000
<i>IKONOS-2</i>				
<i>h</i> , м	74	185	371	927
<i>EROS-A</i>				
<i>h</i> , м	41	103	206	514
<i>Quick Bird</i>				
<i>h</i> , м	82	75	164	409
<i>Orb View-3</i>				
<i>h</i> , м	71	176	352	881

При превышениях, больших, чем указано в таблице 10, необходимо при создании ортофтоплана использовать цифровую модель рельефа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Титаров, П.С. Практические аспекты фотограмметрической обработки сканерных космических снимков высокого разрешения / П.С. Титаров [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.gasurs.ru>-сайт организации «Ракурс».
2. Назаров, А.С. Фотограмметрия / А.С. Назаров. – Минск, ТетраСистем, 2006. – 368 с.
3. Обзор космических систем высокого разрешения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: vinek.narod.ru/satelits.htm.
4. Мельников, А.А. Обзор космических съемочных систем высокого разрешения / А.А. Мельников [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.vvhc.ru>.
5. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.geoprofi.ru> // Журнал по геодезии, картографии и навигации.
6. Адров, В.Н. Критерии выбора данных ДЗЗ для топографического картографирования / В.Н. Адров, Ю.И. Карионов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://vinek.narod.ru/satellites.htm> обзор космических систем.
7. Лавров, В.В. Космические съемочные системы сверхвысокого разрешения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.innjter.com.
8. Grodecki, J. IKONOS Geometric Accuracy / J. Grodecki, G. Dial // Proceedings of Joint Workshop of ISPRS Working Groups I/2, I/5 and IV/7 on High Resolution Mapping from Space 2001, University of Hannover, Germany, Sept 19 – 21, 2001.
9. IKONOS Imagery Products and Product Guide. Space Imaging LLC, 2002.
10. Лавров, В.В. Самые детальные и точные геопространственные данные из космоса / В.В. Лавров, С.Н. Полещук [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://innoter.com/articles/oil_gas_activity/.
11. Бобир, Н.Я. Фотограмметрия / Н.Я. Бобир. – М.: Недра, 1965. – 290 с.
12. Бобир, Н.Я. Фотограмметрия / Н.Я. Бобир, А.Н. Лобанов, Г.Д. Федорук. – М.: Недра, 1974. – 472 с.
13. Инструкция по фотограмметрическим работам при создании топографических карт и планов. – Минск: УП «БелНИЦЗЕМ», 2003. – 78 с.
14. Инструкция по фотограмметрическим работам при создании цифровых топографических карт и планов: ГКНИП (ГНТА)-02-036-02. – М.: ЦНИИГАиК, 2002.

Поступила 24.06.2013

COMPARATIVE ANALYSIS OF FORMULAE OF DISTORTION BECAUSE OF RELIEF ON SCANNER PHOTOS

A. MIKHEEVA, A. ZHUK

Formulae of calculation of distortion of target location of area spots are considered. Recommendations on the choice of the formula for calculation are given. The formula, allowing to calculate acceptable exceeding of area spots regarding median plane on the photo of the territory, less than which there is no need in digital model of relief. Calculation of acceptable exceedings for some satellites is made.