УДК 528.71

ПРОВЕРКА ФОРМУЛ РАСЧЕТА РАЗРЕШЕНИЯ ПРИ СКАНИРОВАНИИ АЭРОФОТОСНИМКОВ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ ТОЧЕК МЕСТНОСТИ

канд. техн. наук, доц. А.А. МИХЕЕВА
(Полоцкий государственный университет);
В.И. МЕДВЕДЕВ
(Завод эффективных промышленных конструкций, Минск)

Инструктивные указания должны являться основой, в соответствии с которой будут выполняться работы, и от качества изданной инструкции будет зависеть качество и стоимость последующих работ, поэтому инструктивные документы должны редактироваться и проверяться особенно тщательно. В рассматриваемой статье выполнен анализ формул расчета элементов разрешения при сканировании аэрофотоснимков для обеспечения точности получаемых пространственных координат на основе формул предрасчета точности. Однако формулы предрасчета точности также не дали однозначных результатов. Между тем все формулы предрасчета точности показывают, что с увеличением фокусного расстояния ошибка определения высот возрастает, а формула определения разрешения при сканировании для обеспечения точности определения высот говорит об обратном. Показано, что в «Инструкции по фотограмметрическим работам при создании цифровых топографических карт и планов» допущена ошибка при расчете разрешения при сканировании для обеспечения точности определения высот.

В Беларуси топографические карты и планы местности создают и обновляют по аэрофотоснимкам, полученным аэрофотоаппаратом (АФА) RC-30 фирмы Leica (Швейцария) с форматом кадра 23 × 23 см и с фокусным расстоянием f = 153 мм. Фирма Leica выпускает аэрофотоаппараты и с другими фокусными расстояниями: f = 88; 153; 213 и 303 мм.

Для создания и обновления карт и планов в настоящее время используют цифровые технологии. Для перевода аэрофотоснимков в цифровую форму негативы сканируют на фотограмметрическом сканере. При этом очень важно правильно выбрать величину геометрического разрешения при сканировании снимков. Для расчета величины разрешения при сканировании в инструкции [1] предложены следующие формулы:

1) величина элемента разрешения для обеспечения точности определения плановых координат P_S

$$P_S = \frac{M_k v_S}{2M_c}, \tag{1}$$

2) величина элемента разрешения для обеспечения точности определения высот P_Z

$$P_Z = \frac{fV_Z}{2bM_c}. \tag{2}$$

В формулах (1) и (2) коэффициент 2 учитывает потерю точности в ходе следующих процессов обработки [1]: сканирования, стереоскопического наведения, опознавания и измерения точек; M_k – знаменатель масштаба карты или плана; M_c – знаменатель масштаба обрабатываемых снимков; b – базис фотографирования на снимке; v_S – требуемая точность определения плановых координат на карте (средняя ошибка плановых координат); V_Z – требуемая точность определения высот (средняя ошибка высот).

Авторы инструкции рекомендуют принимать требуемую точность определения плановых координат на карте (плане) v_S = 0,2 мм [1], что на местности составит:

$$V_S = M_k v_S, \tag{3}$$

а высот – $V_Z = 0{,}2h$, где h – высота сечения рельефа.

Для проведения расчетов выберем параметры фотографирования для создания плана масштаба 1:M_k – 1:2000 с высотой сечения рельефа h = 0,5 м, следовательно, средние ошибки на местности составят: V_S = 0,4 м и V_Z = 0,1 м. Параметры фотографирования приведены в таблице 1.

Таблица 1

Параметры фотографирования

M_c	f, мм				P, %	l × l, см	b, мм	B, м
10000	88	153	213	303	60	23 × 23	92	460
H, м	880	1530	2130	3030	80	23 × 23	46	230
P – продольное перекрытие снимков.								

Значения базиса фотографирования на снимке b и в действительности B вычислены по формулам [2]:

$$b = \frac{l}{100}(100 - P)\,, \tag{4}$$

$$B = bM_C\ . \tag{5}$$

Высоты фотографирования определены на основании формулы [2]:

$$H = M_c f\ . \tag{6}$$

Используя выбранные и вычисленные параметры фотографирования по формулам (1) и (2) рассчитаем величину элемента разрешения для обеспечения точности определения плановых координат P_S и для обеспечения точности обеспечения высот P_Z. Данные расчета представлены в таблице 2.

Таблица 2

Значения величин элементов разрешения при сканировании

Параметр	Значения параметров							
P, %	60				80			
b, мм	92				46			
f, мм	88	153	213	303	88	153	213	303
p_S, мкм	20				20			
p_Z, мкм	5	8,3	12	16,5	10	17	23	33

Как видим, значения элемента разрешения при сканировании для обеспечения точности определения плановых координат P_S не зависит от величины фокусного расстояния f и процента продольного перекрытия P, в то время как с увеличением фокусного расстояния и продольного перекрытия увеличивается значение элемента разрешения при сканировании P_Z.

Анализировать полученные результаты элементов разрешения при сканировании будем по формулам предрасчета точности определения координат в ориентированной модели, т.е. для случая, когда аэрофотосъемка выполнялась при определении координат центров фотографирования из GPS-измерений, снимки были получены с использованием гиростабилизирующей установки.

В литературе [3 – 9] предлагается большое число формул для предрасчета ожидаемой точности определения координат точек местности.

В работе [3] при плановой аэровидеосъемке предварительный расчет ошибок фотограмметрической модели рекомендовано проводить по формулам:

$$m_X = m_Y = 2{,}5H\frac{\sigma}{f}\,, \tag{7}$$

$$m_Z = 1{,}12H\frac{\sigma}{p}\,, \tag{8}$$

где σ – средняя квадратическая ошибка измерений координат на снимке; p – продольный параллакс, равен базису фотографирования на снимке $p = b$ [4].

В работах [5, 6] для определения точности высот m_Z рекомендовано пользоваться формулой:

$$m_Z = 1{,}12\frac{f}{b}M_C\sigma\,, \tag{9}$$

а в работе [7]:

$$m_Z = 1{,}63\frac{H}{b}\cdot\sigma\,. \tag{10}$$

В работе [8] рекомендовано применять следующие формулы:

$$m_X = m_Y = 2{,}5M_C\sigma\,, \tag{11}$$

$$m_Z = 2{,}3\frac{f}{b}\sigma\,. \tag{12}$$

Авторы работы [9] предлагают использовать следующие формулы:

$$m_X = m_Y = 1{,}5 M_C \sigma\,, \tag{13}$$

$$m_Z = 2{,}0 M_C \sigma\,. \tag{14}$$

Задаваемыми для аэрофотосъемки параметрами являются масштаб фотографирования 1:M_C и величина фокусного расстояния f [10, 11], поэтому вместо высоты фотографирования H в формулах (7), (8), (10) подставим ее значение, вычисляемое по формуле (6), и учтем, что $p = b$, тогда вместо (7), (8), (10) будем иметь соответственно следующие формулы:

$$m_X = m_Y = 2{,}5 M_C \sigma\,, \tag{15}$$

$$m_Z = 1{,}12 M_C f \frac{\sigma}{b}\,, \tag{16}$$

$$m_Z = 1{,}63 \frac{M_C f}{b} \sigma\,. \tag{17}$$

После этого можно заметить, что формулы (7) и (11), как и формулы (8) и (9), идентичны, поэтому расчет будем производить по одной из них.

В формулах (1) и (2) для расчета элемента разрешения при сканировании пользуются средними ошибками определения планового положения V_S и высот V_Z, в то время как в формулах предрасчета точности определяют средние квадратические ошибки (СКО) на местности. Переход от средних к средним квадратическим ошибкам осуществляется по формулам [16]:

$$m_S = 1{,}25 V_S, \tag{18}$$

$$m_Z = 1{,}25 V_Z. \tag{19}$$

Как видно из формул (7), (11) и (13), средние квадратические ошибки по осям координат X и Y равны, следовательно, переход от средних квадратических ошибок планового положения к СКО по осям координат будет

$$m_{X,Y} = \frac{m_S}{\sqrt{2}}\,. \tag{20}$$

Требуемая точность определения плановых и высотных координат на местности зависит от масштаба создаваемой карты или плана и высоты сечения рельефа. Величину требуемой точности получим с учетом рекомендаций инструкции [1] для выбранных масштаба плана 1:2000 и высоты сечения рельефа 0,5 м по формулам (18) – (20), которые составят $m_{X,Y}$ = 0,35 м, m_Z = 0,125 м.

Точность измерения координат точек на снимке σ зависит от ошибок внутреннего ориентирования на цифровом снимке, сканирования, распознавания и наведения оператором измерительной марки на точки, СКО за дискретизацию и составляет в среднем 0,5 размера элемента сканирования [13 – 15].

Приняв точность измерения координат на снимке 0,5 размера элементов сканирования, рассчитанных в таблице 2, для параметров съемки, указанных в таблице 1, рассчитаем СКО определения пространственных координат по формулам (12) – (17). Результаты расчета точности определения плановых координат приведены в таблице 3.

Таблица 3

Значения точности определения плановых координат

P_S, мкм	Средние квадратические ошибки $m_{X,Y}$, м		Требуемая точность, м
	$m_{X,Y} = 2{,}5 M_c \sigma$ (15)	$m_{X,Y} = 1{,}5 M_C \sigma$, м (13)	
20	0,250	0,150	0,354

Формулы предрасчета точности показывают, что, рассчитав по формуле (1) величину разрешения для сканирования, получили более высокую точность, чем требуемая. Возможно, разработчики инструкции подстраховались, применив коэффициент 2.

Результаты расчета точности определения высот для сечения рельефа h = 0,5 м приведены в таблице 4.

Таблица 4

Значения точности определения высот в см
при продольном перекрытии аэрофотоснимков P = 60 % (b = 92 мм)

f, мм	88	153	213	303
Разрешение, мкм	5	8,3	12	16,5
$m_Z = 1{,}12\frac{f}{b}M_C\sigma$ (16)	2,7	7,8	15,6	30,4
$m_Z = 1{,}63\frac{M_C f}{b}\sigma$ (17)	3,9	11,4	22,6	44,3
$m_Z = 2{,}3M_C\frac{f}{b}\sigma$ (12)	5,5	16,1	31,9	62,5
$m_Z = M_C\sigma$ (14)	2,5	4,2	6,0	8,2

Требуемая точность при высоте сечения рельефа 0,5 м определена по формуле (19) и составляет 12,5 см.

Результаты расчета точности определения высот при продольном перекрытии 80 % приведены в таблице 5.

Таблица 5

Значения точности определения высот в см
при продольном перекрытии снимков P = 80 % (b = 46 мм)

f, мм	88	153	213	303
Разрешение, мкм	10	17	23	33
$m_Z = 1{,}12\frac{f}{b}M_C\sigma$ (16)	10,7	31,7	84,3	121,7
$m_Z = 1{,}63\frac{M_C f}{b}\sigma$ (17)	15,6	46,1	122,7	177,2
$m_Z = 2{,}3M_C\frac{f}{b}\sigma$ (12)	22,0	65,0	173,1	250,0
$m_Z = M_C\sigma$ (14)	5,0	8,5	11,5	16,5

Формула (2) предложена для обеспечения требуемой точности определения высот. Однако, как видим по данным таблиц 4 и 5, для аэрофотоаппаратов (АФА) с разными фокусными расстояниями f получили различные точностные характеристики, т.е. требуемая точность (12,5 см) в большинстве случаев обеспечена не будет. Более того, с увеличением продольного перекрытия ошибки определения высот возрастают.

Если в формулах (12), (16), (17) СКО прямо пропорциональны f и обратно пропорциональны b, то согласно формуле (14) ошибки возрастают пропорционально знаменателю масштаба фотографирования M_C. Авторы работы [9] проделали большой анализ результатов аэрофотосъемок, выполненных в разных странах мира, и последующей фотограмметрической обработки, по которым и получены формулы (13) и (14). К сожалению, авторы статьи [9] не приводят значения фокусных расстояний АФА, которыми проводилась аэрофотосъемка. Скорее всего, съемка выполнялась АФА с f = 88 мм или 153 мм, форматом кадра 23 × 23 см, так как именно эти АФА применяют за рубежом для создания топографических карт и планов, а АФА с f = 213 или 303 мм используют для создания ортофотопланов [17]. Более высокая точность, полученная по формулам (13) и (14), объясняется тем, что использовались реальные снимки, а не сканированные.

Преобразуем формулы (1) и (2) инструкции [1], подставив в них вместо средней ошибки среднюю квадратическую, и решим относительно СКО:

$$m_{x,y} = \frac{2{,}5P_S M_C}{\sqrt{2}M_k}. \tag{21}$$

По формуле (21) будут получены СКО на плане или карте. Чтобы определить, каковы ошибки на местности, необходимо это выражение помножить на знаменатель масштаба плана (карты), и формула (21) примет вид:

$$m_{X,Y} = \frac{2{,}5P_S M_C}{\sqrt{2}}, \tag{22}$$

а формула (2) будет:

$$m_Z = \frac{2{,}5 P_Z b M_C}{f}. \qquad (23)$$

Анализируя формулы (23) и (12), (16) и (17), видим, что они противоречат друг другу. Формула (23) показывает, что с увеличением *f* ошибки определения высот будут уменьшаться. В свою очередь формулы (12), (16), (17) показывают, что с увеличением *f* ошибки определения аппликат возрастают.

Похоже, авторы инструкции [1] описались и в формуле (2) базис фотографирования на снимке *b* должен быть в числителе, а фокусное расстояние *f* в знаменателе, тогда

$$P_Z = \frac{b V_Z}{2 f M_C}. \qquad (24)$$

Рассчитаем по формуле (24) для выбранных параметров (V_Z = 0,1 м M_C – 10000, *b* = 92 и 46 мм) величину разрешения при сканировании P_Z. Результаты расчетов приведены в таблице 6

Таблица 6

Результаты расчета разрешения при сканировании

f, мм	*b* = 92 мм (*P* = 60 %)				*b* = 46 мм (*P* = 80 %)			
	88	153	213	303	88	153	213	303
P_Z, мкм	5,2	3,0	2,2	1,5	2,6	1,5	1,1	0,75

Используя рассчитанные значения элементов разрешения при сканировании по формулам предрасчета точности определения высот (12), (14), (16), (17), вычислим средние квадратические ошибки определения высот. Результаты представим в таблице 7.

Таблица 7

Средние квадратические ошибки определения высот в сантиметрах
при продольном перекрытии снимков P = 60 % (b = 92 мм)

f, мм	88	153	213	303
Разрешение, мкм	5,2	3,0	2,2	1,5
$m_Z = 2{,}3\frac{f}{b}M_c\sigma$ (12)	5,7	5,7	5,9	5,9
$m_Z = 2{,}0 M_C\sigma$ (14)	5,2	3,0	2,2	1,5
$m_Z = 1{,}12\frac{f}{b}M_C\sigma$ (16)	2,8	2,8	2,8	2,8
$m_Z = 1{,}63\frac{f}{b}M_C\sigma$ (17)	4,0	4,1	4,1	4,0

При продольном перекрытии *P* = 80 % и базисе на снимке *b* = 46 мм ошибки, вычисленные по формуле (14), такие же, как и при *P* = 60 %, а при вычислении по формулам (12), (16) и (17) ошибки высот возросли в два раза.

При вычислении средних квадратических ошибок высот с использованием разрешения, вычисленного по формуле (24), получили одинаковую точность определения высот по формулам (12), (16), (17) при разных фокусных расстояниях *f*, но не получили требуемую точность (12,5 см). Кроме того величины средних квадратических ошибок при расчетах по разным формулам отличаются между собой. Требуются дополнительные исследования для оценки всех рассматриваемых формул. Однако вне сомнения в формуле расчета разрешения при сканировании допущена ошибка.

ЛИТЕРАТУРА

1. Инструкция по фотограмметрическим работам при создании топографических карт и планов. – Минск: УП «БелНИЦЗЕМ», 2003. – 78 с.
2. Михеева, А.А. Прикладная фотограмметрия: учеб.-метод. компл. / А.А. Михеева, В.В. Ялтыхов. – Новополоцк, 2006. – 320 с.

3. Гельман, Р.Н. Аэровидеосъемка, области применения, методика фотограмметрической обработки / Р.Н. Гельман, М.Ю. Никитин, Ю.В. Костандогло // Геодезия и картография. – 1999. – № 1. – С. 39 – 44.
4. Бобир, Н.Я. Фотограмметрия / Н.Я. Бобир, А.Н. Лобанов, Г.Д. Федорук. – М.: Недра, 1974. – 472 с.
5. Панин, А.В. Опыт применения GPS-технологии для построения крупномасштабных цифровых моделей рельефа / А.В. Панин, Р.Н. Гельман // Геодезия и картография. – 1997. – № 10. – С. 22 – 27.
6. Гельман, Р.Н. О расчете ошибок маршрутной фототриангуляции и одиночной модели / Р.Н. Гельман // Геодезия и картография. – 1993. – № 12. – С. 33 – 36.
7. Минько, В.Ю. Технологическое проектирование аэрофотосъемки / В.Ю. Минько. – М.: Недра, 1991. – 154 с.
8. Лобанов, А.Н. Фотограмметрия / А.Н. Лобанов, М.И. Буров, Б.В. Краснопевцев. – М.: Недра, 1987. – 308 с.
9. Ackremann, F. Application of GPS for Aerial Triangulation / F. Ackremann, H. Schade // Photogrammetric Engineering Remote Sensing. – 1993. – Vol. 59, № 11. – P. 1625 – 1632.
10. Технический кодекс по геодезическим работам / Комитет по земельным ресурсам, геодезии и картографии. – Минск, 2006. – 28 с.
11. Аэрофотосъемочные работы / А.А. Попов [и др.]. – М.: Транспорт, 1984. – 200 с.
12. Большаков, В.Д. Теория математической обработки геодезических измерений / В.Д. Большаков, П.А. Гайдаев. – М.: Недра, 1977. – 367 с.
13. Евстратова, Л.Г. Технология создания цифровых карт в свободной системе координат / Л.Г. Евстратова // Геодезия и картография. – 2004. – № 9. – С. 42 – 44.
14. Зайдель, А.Н. Элементарные оценки ошибок измерений / А.Н. Зайдель. – 2-е изд., испр. и доп. – Л.: Наука, Ленингр. отделение, 1967. – 88 с.
15. Книжников, Ю.Ф. Зависимость точности стереоскопических измерений от размера пиксела цифровых снимков / Ю.Ф. Книжников // Геодезия и картография. – 2003. – № 4. – С. 32 – 41.
16. Справочник геодезиста / В.Д. Большаков [и др.]. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1975. – 1056 с.
17. ООО «Геоматика» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http//www.geomatica.kiev.ua/training/ /DataCapture/RemoutSensing/chapter103.html.

Поступила 15.09.2010

CHECKING FORMULAE OF CALCULATING RESOLUTION WHILE SCANNING AIRPHOTOS FOR PROVIDING ACCURACY OF MEASURING COORDINATES OF POINTS IN LOCALITY

A. MIKHEEVA, V. MEDVEDEV

Instructions must be the basis compliance with which work will be done and the quality of an issued instruction results in the quality and cost of the work, that is why instructive documents should be edited and checked with utmost care. In the article can find analysis of formulae of calculating elements of calculating resolution while scanning airphotos. This is done for providing accuracy of ariel coordinates got on the basis of the formulae of accuracy precalculating, those formulae are plenty in literature.

Unfortunately the formulae of accuracy precalculating also didn't give definite results. Nevertheless all the formulae of accuracy precalculating reveal the increase of the mistake in measuring heights with the increase of focal distance, but the formula of calculating resolution while scanning for providing accuracy of measuring heights shows the opposite. In the "Instruction for photogrammetrical work while making up digital topographic maps and plans" there is no doubt a mistake in calculating resolution while scanning for providing accuracy of heights measurement.