

УДК 528.71

**РАСЧЕТ РАЗРЕШЕНИЯ ПРИ СКАНИРОВАНИИ АЭРОФОТОСНИМКОВ
ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ**

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

В.И. МЕДВЕДЕВ

(Завод эффективных промышленных конструкций, Минск)

Эллипсы погрешностей дают более правильное представление о средних квадратических погрешностях, поэтому полученные на их основе данные использовались для обоснования формул предрасчета точности определения координат точек местности и формул расчета разрешения при сканировании для обеспечения требуемой точности определения координат. Результаты вычислений по предложенным формулам подтвердили их справедливость. Показано, что округление рассчитанных масштабов съемки до 500 единиц не влияет на результаты расчета разрешения при сканировании. При низкой квалификации персонала может быть введен поправочный коэффициент в знаменателе формул расчета разрешения при сканировании, но не из-за погрешности сканирования, стереоскопического наведения, опознавания и измерения точек. Эти погрешности учтены в средних квадратических ошибках измерений координат на цифровых изображениях.

В соответствии с Инструкцией [1] величина разрешения при сканировании вычисляется по формулам:

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

$$P_s = \frac{M_k v_s}{2M_c}; \quad (1)$$

2) величина элемента разрешения для обеспечения точности определения высот P_z

$$P_z = \frac{fV_z}{2bM_c}. \quad (2)$$

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). Разработчики инструкции [1] рекомендуют принять $v_s = 0,2$ мм; V_z – требуемая точность определения высот (средняя ошибка высот).

Как отмечено в работах [2; 3], эти формулы не обеспечивают требуемую точность для аэрофотоаппаратов с разными фокусными расстояниями f и не согласуются как с результатами вычислений по формулам предрасчета точности, так и с результатами вычислений по эллипсам погрешностей.

Для вывода формул расчета разрешения при сканировании удобнее пользоваться средними квадратическими ошибками (СКО). Преобразованные формулы (1) и (2) относительно СКО имеют соответственно вид [2; 3]:

$$m_{x,y} = \frac{2,5P_s M_c}{\sqrt{2}}, \quad (3)$$

$$m_z = \frac{2,5P_z b M_c}{f}, \quad (4)$$

где $m_{x,y}$ – СКО определения плановых координат X, Y ; m_z – СКО определения высот.

При проверке формул по эллипсам погрешностей в работах [2; 3] было показано, что в формуле (4) f необходимо поместить в числитель, а b – в знаменатель, тогда формула (4) принимает вид:

$$m_z = \frac{2,5P_z f M_c}{b}. \quad (5)$$

Но и после того, как b и f поменяли местами, было выяснено, что формулы расчета разрешения при сканировании дают значительное занижение точности как по отношению к данным, полученным по эллипсам погрешностей, так и по отношению к данным, полученным по формулам предрасчета точности.

В работе [3] были получены формулы предвычисления средних квадратических ошибок определения как плановых координат $m_{x,y}$, так и высот m_z на основе данных эллипсов погрешностей и рекомендовано пользоваться следующими формулами:

$$m_{x,y} = 0,84M_c\sigma, \quad (6)$$

$$m_z = 1,69\frac{M_c f}{b}\sigma, \quad (7)$$

где σ – СКО измерений на снимке.

Для расчета в работах [2; 3] нами были выбраны следующие параметры: масштаб фотографирования $1:M_c - 1:10000$; масштаб создаваемого плана $1:M_k - 1:2000$; высота сечения рельефа $h - 0,5$ м; базис фотографирования на снимке $b = 92$ мм; при продольном перекрытии $P = 60$ % (продольное перекрытие $P = 80$ % применяется крайне редко, поэтому в этой работе такой случай рассматривать не будем); средняя ошибка на плане $v_s = 0,2$ мм; средняя ошибка на местности $V_s = 0,2M_k = 0,4$ м; средняя ошибка определения высот $V_z = 0$; $2h = 0,4$ м. Значения фокусных расстояний аэрофотокамер $f = 88, 153, 213$ и 303 мм; разрешение при сканировании $P_s = P_z = 14$ мкм; СКО измерений координат на снимке σ была принята равной половине величины разрешения при сканировании [4], следовательно

$$\sigma = \frac{P_s}{2} = \frac{P_z}{2}. \quad (8)$$

Результаты расчета СКО определения плановых координат при продольном перекрытии 60 % приведены в таблице 1.

Таблица 1

Значения средних квадратических ошибок в метрах

По эллипсам ошибок	$m_{x,y} = 0,84M_c\sigma$ (6)	$m_{x,y} = \frac{2,5P_s M_c}{\sqrt{2}}$ (3)
0,059	0,059	0,247

Как видим, СКО, полученные на основании формулы (6), соответствуют данным, полученным по эллипсам погрешностей, а по формуле расчета разрешения при сканировании (3) СКО $m_{x,y}$ получились значительно больше.

Для того чтобы привести значения, полученные по формуле (3), к величинам, полученным по эллипсам погрешностей, рассчитаем поправочный коэффициент $k = \frac{m_{x,y}(3)}{m_{x,y}(6)} = 4,186$ и формула (3) примет вид:

$$m_{x,y} = 0,42P_s M_c. \quad (9)$$

Для обеспечения точности $m_{x,y} = 0,059$ м выбирали масштаб фотографирования в четыре раза крупнее или сканировали снимки с величиной разрешения в четыре раза меньше.

Вычисления по формуле (9) для принятых параметров дали СКО $m_{x,y} = 0,059$ м, т. е. определенная нами СКО совпала с данными эллипса погрешностей и формулы предрасчета точности (6).

Подобный анализ проведем и для формул: (7) – предрасчета точности определения высот; (5) – полученной на основании формулы расчета величины разрешения при сканировании для обеспечения точности определения высот.

Результаты расчетов СКО определения высот при продольном перекрытии $P = 60$ % приведены в таблице 2.

Таблица 2

Значения СКО определения высот в метрах

f , мм	88	153	213	303
По эллипсам	0,113	0,197	0,274	0,390
$m_z = 1,69\frac{M_c f}{b}\sigma$ (7)	0,113	0,197	0,274	0,390
$m_z = \frac{2,5P_z f M_c}{b}$ (5)	0,335	0,582	0,810	1,153
$m_z = 0,845\frac{P_z f M_c}{b}$ (10)	0,113	0,197	0,274	0,389

Анализируя полученные значения в таблице 2, можно сделать вывод, что формула предрасчета точности (7) дает результаты, соответствующие значениям эллипса погрешности, а СКО, полученные по формуле (5), оказались в три раза больше. Введем поправочный коэффициент $k = \frac{m_z(5)}{m_z(7)} = 2,96$, и формула (5) примет вид:

$$m_z = \frac{2,5P_z f M_c}{2,96b} = 0,845 \frac{P_z f M_c}{b}. \quad (10)$$

Результаты вычислений по формуле (10) приведены в таблице 2. Как видим, СКО определения высот m_z идентичны СКО, полученным как по эллипсам погрешностей, так и по формуле предрасчета точности (7).

В Инструкции [1] рекомендуют пользоваться не СКО, а средними ошибкам.

Формула перехода от СКО $m_{x,y}$ к средним $V_{x,y}$ имеет вид [5]:

$$m_{x,y} = 1,25V_{x,y}. \quad (11)$$

Формула обратного перехода будет выглядеть следующим образом:

$$V_{x,y} = \frac{m_{x,y}}{1,25} = 0,8m_{x,y}. \quad (12)$$

Не понятно, почему в Инструкции [1] для перехода от СКО к средним ошибкам принят коэффициент 0,71, а не 0,8, что соответствует теории математической обработки геодезических измерений [5].

С учетом формулы (12) выражения (9) и (10) будут соответственно иметь вид:

$$V_{x,y} = 0,336M_c P_{x,y}, \quad (13)$$

$$V_z = 0,676 \frac{M_c f}{b} P_z. \quad (14)$$

Перейдем от средних ошибок по осям координат к средним ошибкам планового положения [2; 3; 5]:

$$V_s = V_{x,y} \sqrt{2}. \quad (15)$$

С учетом (15) формула (13) будет:

$$V_s = 0,475M_c P_s. \quad (16)$$

В Инструкции приняты средние ошибки на плане, а не на местности, в этом случае формула (16) примет вид:

$$v_s = \frac{0,475M_c P_s}{M_k}. \quad (17)$$

Решим формулы (17) и (14) относительно P_s и P_z :

$$P_s = 2,105 \frac{v_s M_k}{M_c}, \quad (18)$$

$$P_z = 1,48 \frac{V_z b}{f M_c}. \quad (19)$$

Проверим выражения (18) и (19). Для этого на основании формул предрасчета точности определения координат (6) и (7) для обеспечения необходимых СКО $m_{x,y}$ и m_z вычислим масштабы аэрофото съемки для аэрофотоаппаратов с разными фокусными расстояниями f , решив формулы (6) и (7) относительно M_c :

$$M_c = \frac{m_{x,y}}{0,84\sigma}, \quad (20)$$

$$M_c = \frac{m_z b}{1,69 f \sigma}. \quad (21)$$

Расчеты сделаем для выбранных параметров: $M_K - 2000$; $h = 0,5$ м; $V_S = 0,2M_K = 0,4$ м; $m_S = 1,25V_S = 0,5$ м; $m_{x,y} = \frac{m_S}{\sqrt{2}} = 0,354$ м (требуемая точность определения плановых координат); $V_Z = 0,2h = 0,1$ м; $m_Z = 1,25V_Z = 0,125$ м (требуемая точность определения высот); $f = 88; 153; 213; 303$ мм, $\sigma = 7$ мкм, следовательно, сканировать снимки будем с разрешением $P_S = 14$ мкм.

Как видно из формулы (20), масштаб снимков для обеспечения заданной точности определения плановых координат не зависит от величины фокусного расстояния, и для всех фокусных расстояний аэрофотоаппаратов будет одинаков и составит: $1:M_C = 1:60200$, а масштабы съемки для обеспечения точности определения высот для аэрофотоаппаратов с разными фокусными расстояниями будут отличаться. Значения их приведены в таблице 3.

Таблица 3

Значения масштабов фотографирования для обеспечения точности определения высот при $h = 0,5$ м

f , мм	88	153	213	303
$1:M_C$	1:11050	1:6350	1:4565	1:3210

Как видим, чем больше фокусное расстояние у аэрофотоаппарата, тем более крупный масштаб фотографирования должен быть выбран.

Величина элемента разрешения при сканировании для обеспечения точности определения плановых координат по формуле (18) составит $P_S = 14$ мкм.

Расчеты величины разрешения при сканировании для обеспечения точности определения высот по формуле (19) для масштабов фотографирования, вычисленных в таблице 3, приведены в таблице 4.

Таблица 4

Величины разрешения при сканировании для обеспечения точности определения высот при $h = 0,5$ м

f , мм	88	153	213	303
P_Z , мкм	14	14	14	14

Таким образом, получили одинаковые значения разрешения при сканировании для разных фокусных расстояний аэрофотоаппаратов, что, по нашему мнению, справедливо, а масштабы фотографирования различны. Чем больше фокусное расстояние аэрофотоаппарата, тем более крупный масштаб съемки должен быть, так как чем больше фокусное расстояние аэрофотоаппарата, тем сложнее получить отметки с высокой точностью. Кроме того, точность определения высот точек местности обеспечить сложнее при малых высотах сечения рельефа, чем плановое положение.

Выполним расчеты для случая, когда высота сечения рельефа $h = 2$ м, $V_Z = 0,2h = 0,4$ м, $\sigma = 7$ мкм, $m_Z = 1,25V_Z = 0,5$ м. Результаты расчета представлены в таблице 5.

Таблица 5

Значения масштабов фотографирования и величин разрешения при сканировании для обеспечения точности определения высот при $h = 2$ м

f , мм	88	153	213	303
$1:M_C$	1:44000	1:25000	1:18000	1:13000
P_Z , мкм	14	14	14	14

Масштабы съемки, приведенные в таблице 3, вычислены с точностью до последних единиц. Такие масштабы выдержать невозможно. Масштабы фотографирования всегда округляют. В таблице 5 выполнено округление масштабов до 500 единиц, что не повлияло на размер разрешения при сканировании.

И в этом случае масштаб аэрофотосъемки для обеспечения точности определения плановых координат останется прежним. Масштаб фотографирования для обеспечения точности определения высот стал мельче по сравнению с масштабами, приведенными в таблице 3, но и при больших высотах сечения рельефа масштаб фотографирования для обеспечения точности определения высот крупнее, чем для обеспечения точности определения плановых координат. Для фотографирования из двух рассчитанных масштабов выбирают масштаб более крупный. Следовательно, можно уменьшить число плановых опознаков.

Формулы (18) и (19) могут быть рекомендованы для расчета разрешения при сканировании.

Причина, по которой вопрос в справедливости формул (1) и (2) не поднимался ранее, кроется в том, что, во-первых, масштаб фотографирования выбирался более крупный; во-вторых, имеющаяся в Республике Беларусь аэрофотокамера имеет фокусное расстояние $f = 153$ мм, расчеты для которой по неверным

формулам и для продольного перекрытия снимков $P=60\%$, приведенным в работе [3], оказались близки к данным, полученным как по эллипсам погрешностей, так и по формуле предрасчета точности определения высот (7). Поправочный коэффициент 2 в формуле (2), рекомендованный авторами Инструкции [1], случайно оказался кстати. Однако полученные в работе [3] результаты соответствуют формулам предрасчета точности и эллипсам погрешностей, где никаких поправочных коэффициентов не было.

В формулах (1) и (2) поправочный коэффициент 2 введен для учета потерь точности в ходе сканирования, стереоскопического наведения, опознавания и измерения точек [1]. Но, как отмечено в работе [4], СКО измерения $\sigma = 0,5$ размера элемента сканирования учитывает ошибки внутреннего ориентирования, сканирования, распознавания и наведения измерительной марки на точки. Однако для производства возможно и необходимо ввести поправочный коэффициент, особенно если нет уверенности в высокой квалификации персонала, но не 2, а меньший, например, равный 1,2 – 1,3, при постановке которого в знаменатель формул (18) и (19) эти формулы примут вид:

$$P_s = 2,105 \frac{v_s M_k}{1,2(1,3)M_c}, \quad (22)$$

$$P_z = 1,48 \frac{V_z b}{1,2(1,3)fM_c}. \quad (23)$$

Применяя коэффициент 2, придется либо увеличить масштаб фотографирования в два раза, что приведет к увеличению работ в два раза, либо сканировать снимки с размером пиксела, меньшим в два раза, что также приведет к увеличению работ.

Инструкция, или кодекс, – это руководство к действию. Специалисты предприятий должны неукоснительно следовать их требованиям. С течением времени инструктивные документы устаревают, или в них имеют место ошибки, поэтому они должны неоднократно редактироваться и все требования, предъявляемые в них, тщательно проверяться и при необходимости корректироваться.

Рассматриваемая нами Инструкция, однако, не подвергалась ни проверке, ни редактированию.

ЛИТЕРАТУРА

1. Инструкция по фотограмметрическим работам при создании топографических карт и планов. – Минск: УП «БелНИЦЗЕМ», 2003. – 78 с.
2. Михеева, А.А. Проверка формул расчета разрешения при сканировании аэрофотоснимков для обеспечения точности определения координат точек местности / А.А. Михеева, В.И. Медведев // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия Ф. Строительство. Прикладные науки. – 2010. – № 12. – С. 103 – 108.
3. Михеева, А.А. Оценка формул расчета разрешения при сканировании аэрофотоснимков и формул предрасчета точности определения координат точек местности по эллипсам погрешностей / А.А. Михеева, В.И. Медведев // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия Ф. Строительство. Прикладные науки. – 2011. – № 8. – С. 159 – 169.
4. Книжников, Ю.Ф. Зависимость точности стереоскопических измерений от размера пиксела цифровых снимков / Ю.Ф. Книжников // Геодезия и картография. – 2003. – № 4. – С. 32 – 41.
5. Справочник геодезиста / В.Д. Большаков [и др.]. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1975. – 1056 с.

Поступила 25.04.2012

CALCULATION OF THE RESOLUTION WHILE SCANNING FOR PROVIDING ACCURACY FOR DETERMINING COORDINATES

A. MIKHEEVA, V. MEDVEDEV

As the error ellipses give us more accurate information about average square errors, the data got on their basis were used for justification of the formulae of precalculation of the accuracy of determining the coordinates of the points on the surface and the formulae of the calculation of resolution while scanning to provide necessary accuracy of determining coordinates. The results of the calculation according to the suggested formulae proved their correctness. Approximate calculation of the scale to 500 units doesn't influence the results of the calculation of resolution while scanning. If the staff are of low qualification, correlation factor can be introduced to the denominator of the formulae of the calculation of resolution while scanning, but not for the errors in scanning, stereoscopic aiming, recognizing and measuring points. These errors are taken into account in average square errors of measuring coordinates on digital pictures.