

Резерв повышения точности определения высот точек сети — повышение точности отождествления связующих точек. Если последние замаркировать специальными маркирующими приборами на диапозитивах с $m_c = \pm 0,01$ мм, то высоты точек определяются в два раза точнее.

Список литературы: 1. Лобанов А. Н. Аналитическая фотограмметрия. — М.: Недра, 1972. 2. Подопригора О. Г. Об одном из методов исключения систематических погрешностей из высот точек блочной фототриангуляции № 3092—79 Деп. 3. Романовский Г. В. Способ неискаженной модели. — М.: Воениздат, 1948.

Работа поступила в редколлегию 12 октября 1979 года.

УДК 528.711.1

В. М. СЕРДЮКОВ, Г. Б. ЛЫСОВ

ОСОБЕННОСТИ ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ С БЛИЗКИХ РАССТОЯНИЙ

Применение фототеодолитов с постоянным фокусным расстоянием для съемки объектов с близких расстояний ограничивается границами и глубиной разности изображения.

Минимальное расстояние, при котором изображение еще получается резким, для измерительных целей определяют обычно по известной формуле

$$D = F/\delta \cdot d/F, \quad (1)$$

где δ — диаметр допустимого кружка нерезкости; d/F — относительное отверстие объектива фотокамеры.

Расстояние D называют гиперфокальным, оно соответствует расстоянию до точки на оптимальной оси фотокамеры, начиная от которого изображение считается резким при заданном диаметре кружка нерезкости.

Уменьшить минимальное расстояние можно путем диафрагмирования с изменением (увеличением) фокусного расстояния фотокамеры, выдвигая объектив или перемещая прикладную рамку фототеодолита. Как правило, в этих случаях требуется специальное переоборудование фототеодолита.

Расстояние до объекта можно также уменьшить, сокращая фокусное расстояние объектива, что достигается или его заменой на другой, или применением насадочных линз*.

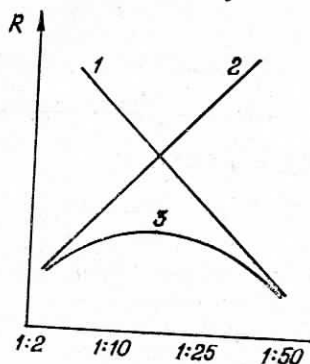
* При киносъемке применяют объективы с переменным фокусным расстоянием, основанные на принципе изменения оптического интервала линз линзами объектива, однако они все узкоугольные и не могут быть использованы для фототеодолитов.

Насадочные линзы обычно ухудшают изображение и вносят искажение, но их применение при определении деформаций практически не влияет на точность измерений, поскольку значения перемещений в масштабе изображения обычно малы. Возможен также путь калибровки фотокамеры для использования ее с целью определения координат объекта.

Нами рассмотрен способ расчета насадочных линз при съемке фототеодолитами с близких расстояний.

Формула (1) получена исходя из законов прямолинейной геометрической оптики и используется в технической и учебной литературе. Однако она не учитывает влияния абберационных искажений и снижения разрешающей способности изображения из-за дифракции света.

Влияние аббераций уменьшается с уменьшением относительного отверстия объектива, а размер дифракционного кружка рассеивания, наоборот, увеличивается с уменьшением относительного отверстия. Поэтому существ-



Зависимость разрешающей способности от дифракционных искажений.

ует еще так называемое критическое относительное отверстие, при котором разрешающая способность становится максимальной.

Графически это положение представлено на рисунке.

Критическое значение относительного отверстия обычно находится в пределах $1/6$ — $1/12$.

При использовании фототеодолитов, отфокусированных на бесконечность, диафрагму обычно устанавливают меньше критической, что объясняется необходимостью снимать объекты ближнего плана с достаточной резкостью.

Однако при расчете минимального расстояния, при котором будет обеспечена достаточная резкость, формулу (1) используют не совсем правильно. Обычно задаются каким-либо кружком нерезкости δ и, варьируя относительным отверстием, рассчитывают гиперфокальное расстояние D (т. е. минимальное расстояние Y_{\min}), при котором будет еще обеспечено получение кружка нерезкости δ , не превышающего заданный.

При использовании формулы (1) следует учитывать зависимость между кружком нерезкости δ и относительным отверстием $\frac{d}{F}$. В соответствии с дифракционной теорией построения изображения эта зависимость может быть представлена формулой

$$\delta = 2,45 \lambda \frac{F}{d}, \quad (2)$$

Подставляя значение $\lambda = 0,55$ мкм, получаем

$$\lambda = 1,3 \frac{F}{d}. \quad (3)$$

Отсюда найдем минимальное значение относительного отверстия, при котором определяем диаметр кружка нерезкости, не превышающий заданный

$$\left(\frac{d}{F}\right)_{\min} = \frac{1,3}{\delta}, \quad (4)$$

где значение коэффициента 1,3 и кружка нерезкости δ выражено в нанометрах. Подставляя значение $\frac{d}{F}$ из формулы (4) в (1), имеем

$$D_{\min} = 1,3 \frac{F^2}{\delta^2}. \quad (5)$$

Это значение гиперфокального расстояния ($D_{\min} = Y_{\min}$) будет минимальным, при котором обеспечивается получение заданного значения кружка нерезкости δ . Если уменьшить диафрагму, то кружок нерезкости увеличится из-за дифракции света, если увеличить диафрагму, то кружок нерезкости увеличится из-за расфокусировки и гиперфокальное расстояние соответственно увеличится, т. е. граница резкости отодвинется от фотокамеры.

Значение минимального относительного отверстия, соответствующего найденному по формуле (5) значению D_{\min} , находим затем по формуле (4). Таким образом, при заданном кружке нерезкости существует минимальное гиперфокальное расстояние D_{\min} , уменьшить которое диафрагмированием нельзя.

Удобство вычислений по формуле (5) требует получения D_{\min} в метрах, для чего следует F брать в сантиметрах, а δ — в сотых долях миллиметра, тогда коэффициент 1,3 необходимо выразить в метрах. Так, при $F = 20$ см, $\delta = 2 \cdot 10^{-2}$ мм имеем

$$D_{\min} = 1,3 \left(\frac{20}{2}\right)^2 = 150 \text{ м.}$$

Относительное отверстие в соответствии с формулой (4) должно быть $\frac{d}{F} = \frac{1}{15}$.

Обобщая формулу (1) и (5), запишем их следующим образом:

$$D_{\min} = 1,3 \left(\frac{F}{\delta}\right)^2 \text{ при } \left(\frac{d}{F}\right)_{\min} = \frac{1,3}{\delta}; \delta = \delta_{\min}; \quad (6)$$

$$D = \frac{F^2}{\delta} \cdot \frac{d}{F} \text{ при } \frac{d}{F} > \left(\frac{d}{F}\right)_{\min}; \delta > \delta_{\min}, \quad (7)$$

где δ_{\min} — заданный минимальный кружок нерезкости.

На основании формул (6)—(7) и табл. 1 приведены значения D_{\min} и D для различных фокусных расстояний при $\delta=0,02$ мм.

Таким образом, при заданном кружке нерезкости минимально целесообразная диафрагма равна 1/15.

Для фототеодолита «Фотео 18/1318» диафрагма равна 1/25, поэтому диаметр кружка нерезкости составляет $\delta=1,3 \frac{F}{d} \approx \approx 0,032$ мм и следовательно, минимальное состояние $Y_{\min}=D_{\min}$,

Таблица 1

Гиперфокальные расстояния при различных фокусных расстояниях объективов и относительных отверстий

| Относительное отверстие | D_{\min}, D при фокусных расстояниях объектива | | | | | |
|-------------------------|--|-----|-----|-----|-----|-----|
| | 50 | 100 | 150 | 200 | 250 | 300 |
| 1:5 | 25 | 100 | 225 | 400 | 625 | 900 |
| 1:10 | 12 | 50 | 112 | 200 | 310 | 450 |
| 1:15 | 8 | 33 | 75 | 130 | 200 | 300 |

при котором будет получена заданная резкость, $D_{\min} = 1,3 \left(\frac{20}{3,2} \right)^2 = 50$ м.

Увеличивая кружок нерезкости до 0,1 мм, что возможно при измерениях по маркированным точкам, получим минимальное возможное отстояние

$$D_{\min} = \frac{F^2}{\delta} \cdot \frac{d}{F} = \frac{200^2}{0,1} \cdot \frac{1}{25} = 16 \text{ м.}$$

Дальнейшее уменьшение расстояния возможно, как уже указывалось выше, или увеличением фокусного расстояния фотокамеры (что достигается выдвиганием объектива или прикладной рамки фототеодолита), или уменьшением фокусного расстояния объектива, или использованием насадочных линз.

Второй путь — использование насадочных линз, — хотя и дает несколько худшее изображение и вносит искажения, но более прост и оперативен. Он даст достаточно хорошие результаты при определении деформаций, когда вносимые объективом искажения практически не сказываются на результатах измерений.

Определим параметры насадочных линз, которые необходимо применять при съемке с близких расстояний в случае использования фототеодолитов, отъюстированных на бесконечность.

Фокусное расстояние объектива при съемке с конечного расстояния при постоянном фокусном расстоянии фотокамеры находим на основании уравнения оптики

$$\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} = \frac{1}{F}, \quad (8)$$

где F — фокусное расстояние объектива.

Применительно к рассматриваемому случаю введем обозначения: $d_1 = f$; $d_2 = Y$, тогда

$$\frac{1}{f} + \frac{1}{Y} = \frac{1}{F}, \quad (9)$$

где f — фокусное расстояние объектива фототеодолита. Решая формулу (9), найдем

$$F = \frac{Yf}{Y+f}. \quad (10)$$

Фокусное расстояние системы из объектива и насадочной линзы можно определить по известной формуле

$$F = \frac{f \cdot f_{\text{л}}}{f + f_{\text{л}} - \Delta}, \quad (11)$$

где $f_{\text{л}}$ — фокусное расстояние насадочной линзы; Δ — оптический интервал, т. е. расстояние между передней узловой точкой объектива и задней узловой точкой линзы.

Таблица 2

Параметры насадочных линз
и фокусных расстояний объектива
с насадочной линзой

| | | | | |
|--|-----|-----|-----|-----|
| Отстояния F , м | 1 | 2 | 5 | 10 |
| Фокусное расстояние $f_{\text{л}}$, м насадочной линзы | 1 | 2 | 5 | 10 |
| Оптическая сила насадочной линзы в диоптриях | 1 | 0,5 | 0,2 | 0,1 |
| Фокусное расстояние объектива с насадочной линзой F , мм | 166 | 182 | 192 | 196 |

Очевидно, эти значения F из формул (10) и (11) должны быть одинаковыми, поэтому, приравнявая, получаем

$$\frac{Yf}{Y+f} = \frac{f \cdot f_{\text{л}}}{f + f_{\text{л}} - \Delta}.$$

Решая полученное выражение, записываем

$$f_{л} = Y - \frac{Y}{f} \Delta. \quad (12)$$

Второй член из формулы (12) меньше первого в $\frac{\Delta}{f}$ раз. Так, при $\Delta = 10$ мм, $f = 200$ мм $\frac{\Delta}{f} = \frac{1}{20}$, поэтому, опуская его, найдем простую формулу для расчета фокусного расстояния насадочной линзы

$$f_{л} = Y. \quad (13)$$

Или, выражая оптическую силу линзы в диоптриях,

$$D_{л} = \frac{1}{f_{л}}, \quad (14)$$

где $f_{л}$ следует брать в метрах. Таким образом, значения фокусных расстояний насадочных линз равны отстояниям Y до со-

Таблица 3
Границы резкости при съемке с близких расстояний

$$\frac{d}{F} = \frac{1}{25}$$

| Допустимый кружок нерезкости δ , мм | Гиперфокальные расстояния D_{\min} , D , фокусные расстояния F и отстояния Y до сопряженной плоскости | | | | | | | |
|--|---|---------------------------|---------|---------------------------|---------|---------------------------|---------|----------------------------|
| | D , м | $F = 166$ мм $Y = 1$ м | D , м | $F = 182$ мм $Y = 2$ м | D , м | $F = 192$ мм $Y = 5$ м | D , м | $F = 196$ мм $Y = 10$ м |
| 0,03 | 40 | 0,05 $\frac{0,98}{1,03}$ | 50 | 0,2 $\frac{1,9}{2,1}$ | 53 | 0,9 $\frac{4,6}{5,5}$ | 55 | 3,8 $\frac{8,5}{12,3}$ |
| 0,05 | 24 | 0,1 $\frac{0,95}{1,05}$ | 32 | 0,25 $\frac{1,9}{2,15}$ | 32 | 1,6 $\frac{4,3}{5,9}$ | 33 | 7,3 $\frac{7,7}{14,7}$ |
| 0,01 | 12 | 0,20 $\frac{0,9}{1,1}$ | 15 | 0,5 $\frac{1,8}{2,3}$ | 16 | 3,1 $\frac{3,8}{7,9}$ | 16 | 20 $\frac{6,0}{26,0}$ |

пряженной плоскости; значения их оптической силы диоптриях приведены в табл. 2. В этой таблице также приведены значения фокусного расстояния объектива фототеодолита с насадочной линзой при $f = 200$ мм.

Для этих значений новых фокусных расстояний выпишем границы резкости при съемке с близких расстояний (табл. 3). Подсчитаем их по формулам*

$$Y_{\min} \approx \frac{DY}{D+Y}; \quad Y_{\max} \approx \frac{DY}{D-Y}. \quad (15)$$

Следует отметить, что приведенные в табл. 3 глубины резкости при $\delta=0,05$ мм и $\delta=0,1$ мм не являются предельными, поскольку они рассчитаны с учетом формул (7), когда относительное отверстие не является критическим.

Таблица 4
Оптимальные границы резкости при съемке с близких расстояний при использовании насадочных линз

| Допустимый кружок нерезкости δ , мм | Критическое относительное отверстие $\frac{d}{F}$ | Гиперфокальное расстояние D_{\min} , фокусные расстояния F и отстояния Y до сопряженной плоскости | | | | | |
|--|---|---|--------------------------|---------|------------------------|---------|------------------------|
| | | D , м | $F = 166$ $Y = 1$ м | D , м | $F = 182$ $Y = 2$ м | D , м | $F = 192$ $Y = 5$ м |
| 0,03 | 1/25 | 40 | 0,05 $\frac{0,98}{1,03}$ | 50 | 0,2 $\frac{1,9}{2,1}$ | 53 | 0,9 $\frac{4,6}{5,5}$ |
| 0,05 | 1/40 | 13 | 0,15 $\frac{0,95}{1,1}$ | 17 | 0,5 $\frac{1,8}{2,3}$ | 19 | 2,7 $\frac{4,0}{6,7}$ |
| 0,1 | 1/80 | 3 | 0,8 $\frac{0,7}{1,5}$ | 4 | 2,7 $\frac{1,3}{4,0}$ | 5 | $\frac{2,5}{\infty}$ |

Для увеличения глубины резкости по формуле (4) найдем критическое относительное отверстие:

$$\text{при } \delta = 0,05 \text{ мм } \frac{d}{F} = \frac{1,3 \text{ ммк}}{0,05 \text{ мм}} = \frac{1}{40};$$

$$\text{при } \delta = 0,1 \text{ мм } \frac{d}{F} = \frac{1}{80}.$$

Воспользовавшись значениями диафрагмы, получим гиперфокальные расстояния, глубины и границы резкости, приведенные в табл. 4.

* Сердюков В. М. Фотограмметрия в промышленном и гражданском строительстве. — М.: Недра, 1977.

Сравнение табл. 3 и 4 свидетельствует, что при критических относительных отверстиях (табл. 4) границы и глубины резкости значительно расширяются.

Отметим, что камера УМК 10/1318 имеет минимальную диафрагму 1/32. Это несколько снижает ее возможность при съемке маркированных объектов с близких расстояний.

На основании приведенных расчетов можно установить следующее. При подсчете гиперфокального расстояния следует учитывать зависимость разрешающей способности от его относительного отверстия. В случае съемки с малых отстояний фототеодолитами, отфокусированными на бесконечность, можно при определении деформаций использовать насадочные линзы, что упрощает процесс подготовки фототеодолита и не требует его переделки.

У фототеодолитов, предназначенных для съемок с близких расстояний, целесообразно иметь переменную диафрагму в пределах 1/8—1/62.

Работа поступила в редколлегию 6 ноября 1979 года.
