

Н. Е. ГРУЗИН, В. С. КЛОЧКО, А. Е. ФЕДОРИЩЕВ

СПОСОБЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЛЛИМАЦИОННОЙ ОШИБКИ ТЕОДОЛИТА

Известно, что коллимационную ошибку C определяют не только для того, чтобы привести ее к величине, не превышающей допуск, но и для исследования стабильности визирной оси.

К точности вычисления C могут быть предъявлены различные требования. Важно в каждом конкретном случае выбрать наиболее рациональный способ нахождения этой величины.

Величину ошибки C можно установить различными способами, основанными на одном из геометрических свойств теодолита: угол, образованный визирной осью трубы при двух ее положениях (КП и КЛ) в горизонтальной плоскости, равен 180° без удвоенной коллимационной ошибки. При нахождении коллимационной ошибки для фиксирования положения визирной оси используют различные объекты визирования (точка A ; точка A и рейка; две рейки, располагаемые в створе с теодолитом), которые должны быть на одном уровне с инструментом на расстоянии, равном среднему рабочему и обеспечивающем неизменность фокусировки трубы. При исследовании стабильности визирной оси это расстояние является переменным и, поскольку при этом требуется высокая точность определения коллимационной ошибки, объекты визирования должны отвечать условиям, исключающим влияния рефракции.

Первый (общезвестный) способ [1, 2, 7] основан на угловых измерениях и сводится к взятию отсчетов по горизонтальному кругу a_1 и a_2 при двух положениях вертикального круга при визировании трубы на точку A . Коллимационную ошибку вычисляют по формуле

$$C = \frac{1}{2} [a_1 - (a_2 - 180^\circ)]. \quad (1)$$

Второй способ [4, 6] также основан на угловых измерениях и состоит в том, что после наведения на точку A и взятия отсчета a_1 , на горизонтальном круге откладывают угол 180° и переводят трубу через зенит. Если центр сетки нитей при этом не совпадает с точкой A , то для определения коллимационной ошибки необходимо совместить центр сетки с точкой A и взять отсчет a_2 . Величину C находят по формуле (1).

В. С. Ключко предложил третий способ, предусматривающий многократное применение первого способа, но в отличие от него каждое последующее определение коллимационной ошибки начинается относительно предыдущего взаимного положения лимба и алидады путем наведения трубы на точку A вращением лимба. Для вычисления коллимационной ошибки принимают начальный a_1 и конечный a_2 отсчеты по лимбу. Это повышает точность определения C , поскольку все промежуточные отсчеты исключаются. Кроме того, индекс алидады в разных повторениях занимает новое положение на лимбе относительно начального отсчета, что важно для исключения влияния эксцентриситета (при одностороннем отсчетном приспособлении), так как в этом случае необходимо расположение a_1 и a_2 на одной стороне лимба (рис. 1, a). Число повторений k будет четным. И коллимационную ошибку находим по формуле

$$C = \frac{1}{2k} (a_n - a_1). \quad (2)$$

нии створа «рейка-инструмент» (рис. 1, б). Другими словами, при КП труба наводится на точку А, затем переводится через зенит и берется отсчет по рейке b_1 . После этого при КЛ труба наводится еще раз на точку А, переводится через зенит и по рейке берется отсчет b_2 . Величину C определяют по формуле

$$C = \frac{1}{4S} (b_1 - b_2) \rho. \quad (4)$$

Линейным является предложенный В. С. Ключко пятый способ, заключающийся в многократном последовательном отложении угла $180^\circ - 2C$ относительно реек P_1 и P_2 , в створе между которыми установлен теодолит (рис. 1, в). При КП трубу наводят на штрих b_1 , переводят ее через зенит и берут отсчет b_2 по рейке P_2 . Снова при КП наводят на штрих b_2 , переводят трубу через зенит и берут отсчет b_3 и так k раз. В этом случае

$$C = \frac{1}{2kS} (b_k - b_1) \rho. \quad (5)$$

К типу линейно-угловых относится предложенный Н. Е. Грузиным и А. Е. Федорищевым шестой способ, когда угол $180^\circ - 2C$ передается на рейку один раз при КЛ относительно штриха b_1 (рис. 1, г), а при КП трубу наводят на штрих b_1 и берут отсчет по горизонтальному кругу a_1 . Поворачивают алидаду на 180° , переводят трубу через зенит, по рейке берут отсчет b_2 . Коллимационную ошибку вычисляют по формуле

$$C = \frac{1}{2S} (b_2 - b_1) \rho. \quad (6)$$

Линейно-угловым можно считать и седьмой способ (разработан теми же авторами), отличающийся от предыдущего тем, что величину C определяют многократно. Для этого при КП наводят трубу на штрих b_1 , поворачивают алидаду на 180° , переводят трубу через зенит и берут отсчет b_2 . Затем алидаду снова поворачивают на 180° , трубу переводят через зенит и при КП берут отсчет b_3 и так k раз (рис. 1, д). Коллимационную ошибку находят по формуле (5).

Таким образом, для установления коллимационной ошибки существует семь способов. При выборе наиболее рационального в каждом конкретном случае необходимо исходить из следующих требований: определение величины C должно быть простым, экономичным, достаточно точным и свободным от систематических ошибок. В этом отношении первый, второй и шестой способы не могут быть рекомендованы для проверки теодолитов с односторонним отсчетным приспособлением, так как они не обеспечивают исключения ошибок за эксцентриситет алидады. Необходимость применения одной или двух реек в четвертом—седьмом способах не следует считать недостатком, ибо точка

визирования должна быть не просто «удаленной» (как это принято), а расположенной на среднем рабочем расстоянии (100—150 м). Ясно, что такую точку легче фиксировать с помощью рейки или марки. Для расчета точности способов применим теорию ошибок к формулам (1)—(6), учитывая при этом, что коллимационная ошибка имеет линейную зависимость от случайных ошибок отсчета по лимбу и рейке.

Анализ формул (1)—(6) показывает, что точность величины S определяется истинными ошибками: визирования (Δ_b), отсчета по шкале микрометра горизонтального круга (Δ_0), совмещения штрихов лимба (Δ_M), отсчета по рейке (Δ_P). Кроме того, при нахождении коллимационной ошибки третьим, пятым и седьмым способами на точность последней будут влиять также ошибки наведения на штрихи реек (Δ'_P и Δ''_P). Зависимость между истинными ошибками рассматриваемых способов показана ниже (k — число повторений):

Способы

Истинные ошибки

$$\begin{aligned}
 1 \quad \Delta_c &= \frac{1}{2} (\Delta_{b_1} + \Delta_{0_1} + \Delta_{b_2} + \Delta_{0_2}) \\
 2 \quad \Delta_c &= \frac{1}{2} (\Delta_{b_1} + \Delta_{0_1} + \Delta_{b_2} + \Delta_{0_2}) \\
 3 \quad \Delta_c &= \frac{1}{2k} (\Delta_{b_1} + \Delta_{b_2} + \dots + \Delta_{b_k} + \Delta_{0_1} + \Delta_{0_k}) \\
 4 \quad \Delta_c &= \frac{1}{4} \left(\Delta_{b_1} + \Delta_{P_1} \frac{\rho}{S} + \Delta_{b_2} + \Delta_{P_2} \frac{\rho}{S_1} \right) \\
 5 \quad \Delta_c &= \frac{1}{2k} \left[\Delta_{b_1} + \frac{\rho}{S} (\Delta'_{P_1} + \Delta''_{P_2} + \dots + \Delta'_{P_k} + \Delta''_{P_1} + \Delta''_{P_2} + \dots + \Delta''_{P_{k-1}}) \right] \\
 6 \quad \Delta_c &= \frac{1}{2} \left(\Delta_{b_1} + \Delta_{0_1} + \Delta_M + \Delta_{P_1} \frac{\rho}{S} \right) \\
 7 \quad \Delta_c &= \frac{1}{2k} \left[\Delta_{b_1} + \Delta_{M_1} + \Delta_{M_2} + \dots + \Delta_{M_k} + \Delta_{0_1} + \Delta_{0_2} + \right. \\
 &\quad \left. + \Delta_{0_k} + \frac{\rho}{S} (\Delta_{P_1} + \Delta'_{P_1} + \Delta'_{P_2} + \dots + \Delta'_{P_{k-1}} + \Delta_{P_k}) \right]
 \end{aligned}$$

Переходя от истинных ошибок, приведенных выше, определим средние квадратические ошибки величины S :

Способы

Значение средней квадратической ошибки

$$\begin{aligned}
 1, 2 \quad m_c &= \frac{1}{2} \sqrt{2(m_b^2 + m_0^2)} \\
 3 \quad m_c &= \frac{1}{2k} \sqrt{km_b^2 + 2m_0^2}
 \end{aligned}$$

$$4 \quad m_c = \frac{1}{4} \sqrt{2 \left[m_b^2 + m_p^2 \left(\frac{\rho}{S} \right)^2 \right]}$$

$$5 \quad m_c = \frac{1}{2k} \sqrt{m_b^2 + (2k-1) m_p^2 \frac{\rho^2}{S^2}}$$

$$6 \quad m_c = \frac{1}{2} \sqrt{m_b^2 + m_M^2 + m_0^2 + m_p^2 \left(\frac{\rho}{S} \right)^2}$$

$$7 \quad m_c = \frac{1}{2k} \sqrt{m_b^2 + k \left[m_0^2 + m_M^2 + m_p^2 \left(\frac{\rho}{S} \right)^2 \right]}$$

Очевидно, строгое сравнение точности способов определения коллимационной ошибки в общем виде невозможно, так как точность зависит от параметров, влияние которых на величину m_c проявляется по-разному. Эта задача может быть решена только применительно к каждому конкретному прибору. Приближенное решение задачи возможно, если произвести некоторый анализ изучаемого вопроса.

Во-первых, если учесть, что увеличение трубы в современных точных и технических теодолитах варьирует в пределах 18—25 \times [8]. Приняв среднее его значение — 20 \times , по формуле средней квадратической ошибки визирования [2]

$$m_b = \frac{60''}{v\sqrt{3}}, \quad (7)$$

где v — увеличение трубы, получим для точных и технических теодолитов

$$m_b = 2''. \quad (7')$$

Во-вторых, известно, что средняя квадратическая ошибка отсчета по рейке m_p зависит от длины визирного луча. Принимая его длину равной 100 м, найдем $m_p = 2$ мм [3], или в угловом выражении

$$m_p = 4''. \quad (8)$$

В-третьих, с некоторым приближением можно принять, что

$$m_0 \approx m_M. \quad (9)$$

Тогда точность определения коллимационной ошибки легко представить в функции ошибки m_0 и числа повторений k следующим образом. Предположим, что между m_0 , m_b и m_p существуют зависимости:

$$m_b = \frac{m_0}{t}, \quad (10) \quad m_p = \frac{m_0}{q}, \quad (11)$$

где t и q — некоторые постоянные величины.

Из формул (10) и (11) найдем

$$tm_b = qm_p$$

или с учетом (7) и (8) получим

$$t = 2q. \quad (12)$$

Естественно, значение $t = \frac{m_0}{m_b}$ может изменяться в широких пределах, но для конкретного теодолита — это величина постоянная. Для простоты вычислений примем

$$t = 1. \quad (13)$$

Тогда на основании (7), (8), (9) и (13) значения ошибок (см. с. 102) можно преобразовать в следующие:

Способы	Значение m_c
1, 2	$m_c = m_0$
3	$m_c = \frac{m_0}{2k} \sqrt{k+2}$
4	$m_c = 0,56m_0$
5	$m_c = \frac{m_0}{2k} \sqrt{8k-3}$
6	$m_c = 1,32m_0$
7	$m_c = \frac{m_0}{2k} \sqrt{6k+1}$

Анализируя приведенные выше данные, можно сделать вывод, что при однократном определении коллимационной ошибки наиболее точным является линейный (четвертый) способ, который практически в 2 раза точнее общепринятых угловых (первого и второго) и предлагаемого линейно-углового (шестого) способов. Первый и второй способы по точности являются одинаковыми. В способах, основанных на многократном нахождении величин (третьем, пятом и седьмом), ошибка m_c зависит от числа повторений, и легко заметить, что при $k=1$ они по точности одинаковы соответственно с первым, вторым и шестым способами. Увеличение же числа повторений приводит к некоторому повышению точности (рис. 2).

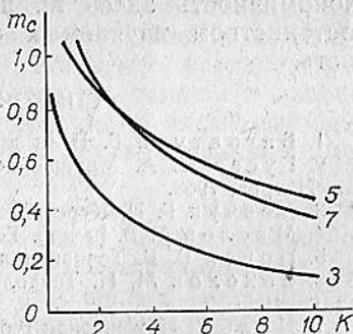


Рис. 2. Зависимость между m_c и k : 3, 5, 7 — номер способа.

Как видим из рис. 2, пятый и седьмой способы по точности практически являются одинаковыми. При этом, для достижения точности, которую обеспечивает четвертый способ, необходимо выполнить 5—6 повторений, что практически нецелесообразно. Более эффективным является третий способ, который при $k=2$ обеспечивает такую же точность, как и четвертый, а при $k=5$ значение m_c уменьшается почти в 5 раз.

Таким образом, в результате анализа точности установлено, что при однократном определении коллимационной ошибки наиболее точным является четвертый (линейный) способ, а при исследовании постоянства визирной оси — третий. Кроме того, эффективность этих способов состоит в том, что в процессе определения величины, как отмечалось ранее, практически исключается влияние эксцентриситета алидады в теодолитах с односторонним отсчетным приспособлением.

Если рассматривать эти способы с экономической точки зрения, то есть по затратам времени, то при этом необходимо исходить из количества основных операций, выполняемых для определения коллимационной ошибки. Такими операциями являются визирование на соответствующие точки и взятие отсчетов по рейке или лимбу. Эти операции отражаются соответствующими истинными ошибками, характеризующими точность решения поставленной задачи (см. с. 103). Из данных, приведенных на с. 101, 102, видно, что во всех однократных способах (первом, втором, четвертом и шестом) количество основных операций не превышает пяти. В способах повторений исходное количество операций (применительно к $k=1$) равно трем, и по мере увеличения числа повторений к этому количеству добавляется одна операция в каждом повторении в третьем способе и по две операции в пятом и седьмом способах. Следовательно, и однократные способы, и способы повторения при $k=2$ имеют практически одинаковую трудоемкость. Учитывая, что определение коллимационной ошибки на практике не представляет массовую работу, экономичность здесь не играет существенной роли. Основным достоинством изучаемых способов необходимо признать точность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Багратуни Г. В. [и др.]. Инженерная геодезия. М., «Недра», 1969.
2. Гусев Н. А. Маркшейдерско-геодезические инструменты и приборы. М., «Недра», 1968.
3. Левчук Г. П. Курс инженерной геодезии. М., «Недра», 1970.
4. Маслов А. В. [и др.]. Геодезия. Ч. 1. М., «Недра», 1968.
5. Попов В. В. Точная полигонометрия. М., «Геодезиздат», 1953.
6. Соколов М. Н. Теодолиты малой и средней точности. М., «Геодезиздат», 1956.
7. Циль В. Инженерная геодезия. М., «Недра», 1974.
8. ГОСТ 10529—70 Теодолиты. Типы. Основные параметры и технические требования. М., Изд-во стандартов, 1973.

Работа поступила в редколлегию 22 апреля 1976 года. Рекомендована кафедрой геодезии Львовского политехнического института.