УДК 528.283

И.С.ПАНДУЛ
Санкт-Петербургский государственный горный институт (технический университет)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ШИРОТЫ И АЗИМУТА БЕЗ ПОМОЩИ ХРОНОМЕТРА ПО ЗВЕЗДЕ С НЕИЗВЕСТНЫМИ КООРДИНАТАМИ

Предложен новый оригинальный способ определения астрономического азимута направления без знания координат места, звездного времени и экваториальных координат звезды. Азимут определяется по двойным измерениям зенитных расстояний одной и той же звезды, горизонтальных направлений на нее и по замерам с помощью секундомера разности часовых углов. Дано теоретическое обоснование способа, исследованы выгоднейшие условия наблюдений. Приведена методика измерений, последовательность полевых этапов производства работ. Даны схемы журнала наблюдений и ведомости вычислений. Предлагаемый способ позволит шире внедрить определения астрономических азимутов в практику топографических и прикладных геодезических работ.

New original astronomic azimuth of any distance method without knowledge the point coordinates, sidereal time and equatorial coordinates of star is suggested. Azimuth is determined using double measured zenith distances of the same star, its horizontal bearings and difference of hour angles. The latter is obtained by a stopwatch. The theory of the method is given; the optimal observation conditions are investigated. The measure methods and field sequences are described. The field book schemes and calculation lists are shown. The offered method allows wider introduction of astronomical azimuth measurements into topographic and applied geodetic works.

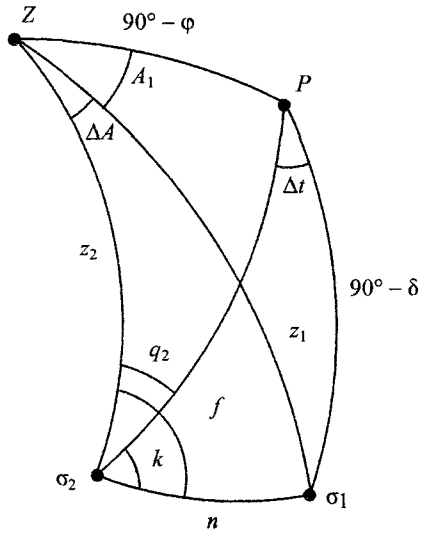
Широкому применению определений астрономических азимутов по наблюдениям звезд препятствует необходимость знания географических координат места, экваториальных координат звезд и определения звездного времени, для чего требуется звездный хронометр. Кроме того, при выполнении наблюдений в ночное время необходимо искусственное освещение теодолита и визирной марки. При определении азимутов широту и долготу места обычно определяют по топографической карте крупного масштаба, но рядовому изыскателю топографические карты с зарамочным оформлением практически недоступны. Экваториальные координаты светил (звезд и Солнца) приводятся в Астрономическом ежегоднике, который выходит в свет крайне ограниченными тиражами.

Предлагается способ определения азимута без знания координат места, звездного времени и экваториальных координат звезды. Азимут определяется по двойным измерениям зенитных расстояний одной и той же неизвестной звезды, горизонтальных направлений на нее и по измерению с помощью среднего секундомера разности часовых углов. Спортивный секундомер позволяет брать отсчет до сотых долей секунды. Здесь и далее в статье имеются в виду азимуты, отсчитываемые от точки севера.

Сущность способа заключается в следующем. Пусть теодолитом через небольшой промежуток времени измерены горизонтальные направления N_1 и N_2, зенитные расстояния z_1 и z_2 двух точек суточной параллели некоторой звезды и разность часовых углов Δt этих точек (см. рисунок). Тогда

$$\Delta A = N_2 - N_1;\ \Delta t = m + \mu m, \qquad (1)$$

где m – промежуток времени наблюдений в средних единицах времени, измеренный с помощью секундомера; μm – редукция перехода от среднего времени к звездному, $\mu = 0{,}00273791$.



Параллактические треугольники мест светила σ

Из треугольника $P\sigma_1\sigma_2$ найдем

$$\cos n = \sin\delta\sin\delta + \cos\delta\cos\delta\cos\Delta t; \quad (2)$$

$$\sin\delta = \cos n\sin\delta + \sin n\cos\delta\cos k. \quad (3)$$

Из треугольника $Z\sigma_1\sigma_2$ определим

$$\cos n = \cos z_1\cos z_2 + \sin z_1\sin z_2\cos\Delta A; \quad (4)$$

$$\cos z_1 = \cos z_2\cos n + \sin z\sin n\cos f. \quad (5)$$

Из формул (2) и (4) получим

$$1-\cos^2\delta(1-\cos\Delta t) =$$

$$= \cos z_1\cos z_2 + \sin z_1\sin z_2\cos\Delta A,$$

откуда

$$\delta = \arccos\left(\frac{1-\cos z_1\cos z_2 - \sin z_1\sin z_2\cos\Delta A}{1-\cos\Delta t}\right)^{1/2}. \quad (6)$$

Теперь определим широту φ. Из формулы (2)

$$n = \arccos(\sin^2\delta + \cos^2\delta\cos\Delta t),$$

из формулы (3)

$$k = \arccos\frac{(1-\cos n)tg\delta}{\sin n};$$

из формулы (5)

$$f = \arccos\frac{\cos z_1 - \cos z_2\cos n}{\sin z_2\sin n}.$$

Тогда для треугольника $ZP\sigma_2$ параллактический угол $q_2 = f - k$. Если светило расположено в западной половине неба, то $q_2 = k - f$. В общем виде

$$q_2 = \pm(f-k)\,|\,O^{st}/W.$$

Из треугольника $ZP\sigma_2$ $\sin\varphi = \cos z_2\sin\delta + \sin z_2\cos\delta\cos q_2$, откуда

$$\varphi = \arcsin(\cos z_2\sin\delta + \sin z_2\cos\delta\cos q_2). \quad (7)$$

Наконец, из треугольника $ZP\sigma_1$ получим

$$\sin\delta = \sin\varphi\cos z_1 + \cos\varphi\sin z_1\cos A_1, \quad (8)$$

откуда

$$A_1 = \arccos\frac{\sin\delta - \sin\varphi\cos z_1}{\sin z_1\cos\varphi}. \quad (9)$$

Теперь мы имеем возможность определить на местности направление меридиана. Этому направлению будет соответствовать отсчет горизонтального круга теодолита, называемый местом севера M_N,

$$M_N = N_1 - A_1. \quad (10)$$

Зная место севера, всегда легко получить астрономический азимут направления на земной предмет:

$$A_{\text{астр}} = N_0 - M_N, \quad (11)$$

где N_0 – горизонтальное направление на земной предмет.

Формулами (6), (7), (9)-(11) будем пользоваться при определении искомого азимута.

Выгоднейшие условия способа определяются формулой

$$m_A = \frac{1}{\cos\varphi\sin t}m_\delta + \frac{\cos q}{\cos\varphi\sin t}m_z - \frac{1}{\cos\varphi\,\mathrm{tg}\,t}m_\varphi,$$

которая следует из формулы (8) дифференцированием по переменным δ, z, φ, A.

Наиболее благоприятные условия определения азимута предлагаемым способом будут при наблюдении звезды вблизи первого вертикала. В этом случае параллактический угол q достигает наибольшего значения, $\cos q$ приближается к своему минимуму, $\sin t$ будет близок к единице, а $\mathrm{tg}\,t$ – стремится к бесконечности. Следовательно,

Таблица 1

Схема журнала наблюдений

Дата_____ Место_____ Номер теодолита_____ Время: от_____ до_____

№ п/п	Объект визирования	Секундомер	Вертикальный круг	Горизонтальный круг	Вычисления		
1	КП, предмет	–	$П$	N_0	MZ	z_1'	z_3'
2	Наведение 1	–	$П_1$	N_1	N_0	ρ_1	ρ_3
3	Наведение 2	m_1	$П_2$	N_2	ΔA_1	z_1	z_3
4	КЛ, наведение 3	–	$Л_3$	N_3	ΔA_2	z_2'	z_4'
5	Наведение 4	m_2	$Л_4$	N_4	Δt_1	ρ_2	ρ_4
6	Предмет	–	$Л$	N_0'	Δt_2	z_2	z_4
7	Метеоданные	$t_1 =$ °С	$B_1 =$ мм рт.ст.	$t_2 =$ °С	$B_2 =$ мм рт.ст.		

совместное влияние ошибок m_z, m_δ и m_φ на определяемый азимут будет минимальным. Влияние ошибки m_δ на измеряемый азимут почти не зависит от выбора звезды и в среднем равно ошибке m_z измерения теодолитом зенитного расстояния звезды. В первом приближении погрешность определяемого азимута от ошибки измерения зенитного расстояния можно выразить зависимостью $m_A = m_z[(1+\cos q)/(\cos\varphi \sin t)]$.

Желательно, чтобы звезда была расположена в западной или восточной части неба невысоко над горизонтом, на зенитных расстояниях менее 70°. Наблюдать можно любую звезду, лишь бы она была заметной и легко опознаваемой для повторных наблюдений. Измеренное зенитное расстояние отягощено приборными погрешностями, ошибкой наведения на звезду и ошибкой определения астрономической рефракции. Для учета астрономической рефракции в каждом приеме необходимо измерять температуру t в градусах Цельсия и атмосферное давление воздуха B (в миллиметрах ртутного столба).

Порядок наблюдений. Для производства наблюдений необходим теодолит, один или два секундомера, наружный термометр, карманный фонарик и световая визирная цель. Последнюю легко изготовить из другого фонарика, если наклеить на стекло фонарика диафрагму, а к футляру приделать приспособление для крепления его к визирной цели. Для обеспечения устойчивости теодолита ножки штатива следует устанавливать на кирпичи или вбитые в землю колья.

Полный прием наблюдений состоит из двух полуприемов. В первом полуприеме – круг право (круг лево) – последовательность действий следующая:

1) визирование на земной предмет с взятием отсчетов N_0 по горизонтальному и $П$ по вертикальному кругам; перед каждым отсчетом по вертикальному кругу пузырек уровня при алидаде вертикального круга приводят в нуль-пункт;

2) визирование на звезду с включением секундомера и взятием отсчетов N_1 по горизонтальному и $П_1$ по вертикальному кругам;

3) через 20-30 мин вторичное визирование на ту же звезду с отключением секундомера, взятие отсчетов m_1 по нему и отсчетов N_2 по горизонтальному и $П_2$ по вертикальному кругам.

Второй полуприем – круг лево (круг право):

4) визирование на ту же звезду с включением секундомера, отсчеты N_3 по горизонтальному и $Л_3$ по вертикальному кругам;

5) через 20-30 мин вторичное визирование на звезду с отключением секундомера, отсчет m_2 и отсчеты N_4 по горизонтальному и $Л_4$ по вертикальному кругам;

6) повторное визирование на земной предмет*, отсчеты N_0' по горизонтальному и $Л$ по вертикальному кругам.

Методика визирования на звезду. После грубого захвата звезды горизонтальную нить следует установить на пути видимого

* Вертикальный круг при визировании на земной предмет отсчитывают для последующего вычисления места зенита MZ.

движения звезды в поле зрения трубы. Ввести изображение звезды в биссектор и удерживать его там до контакта с горизонтальной нитью. В этот момент надо прекратить вращение наводящего винта алидады, включить (выключить) секундомер и последовательно отсчитать вертикальный и горизонтальный круги теодолита, предварительно убедившись в том, что пузырек уровня при алидаде вертикального круга находится в нуль-пункте. При выполнении приема в промежутках между первым и вторым и между третьим и четвертым наблюдениями звезды измерять температуру и атмосферное давление воздуха, необходимые для вычисления астрономической рефракции ρ. Для вычисления этих поправок брать метеоданные для конкретной пары наблюдений (табл.1).

После первого наблюдения звезды можно найти другую приметную звезду в той же половине неба и сразу начать второй прием измерений при том же круге, используя другой секундомер. Можно использовать во втором приеме ту же самую звезду. Наблюдения второй звезды в самостоятельном приеме необходимо вести в той же последовательности, что и первой. Естественно, что при другом круге второй прием будет завершен после первого приема. При обработке второго приема измерений можно использовать данные температуры и атмосферного давления воздуха из первого приема. Во втором приеме можно вторично не определять место зенита, т.е. не отсчитывать вертикальный круг теодолита при наведении трубы на земной предмет. Непременное условие, налагаемое при этом, – полная неподвижность лимба в течение обоих приемов.

Для уменьшения ряда ошибок, в частности ошибки определения широты φ, желательно отнаблюдать третью и четвертую звезды в противоположной стороне неба по изложенной выше методике. Между наблюдениями западных и восточных звезд лимб горизонтального круга теодолита надо переставить примерно на 90°.

Обработка журнала наблюдений. Вычислить MZ, с его помощью найти видимые зенитные расстояния z' по той формуле, которая соответствует данному типу теодолита. Истинные зенитные расстояния получить, как $z = z' + \rho$, где ρ – истинная астрономическая рефракция, которую можно вычислить по формуле

$$\rho = 60{,}3'' \frac{B}{760} \frac{273\ ^\circ\mathrm{C}}{t + 273\ ^\circ\mathrm{C}} \operatorname{tg} z'.$$

Далее надо вычислить ΔA и Δt по формулам (1). Дальнейшие вычисления выполнять по схеме, показанной в табл.2. Вычисления места севера M_N по каждому отдельному полуприему будут различаться между собой вследствие влияния ошибки в определении MZ, поэтому на последнем этапе вычислений берут среднее значение места севера из приема.

Таблица 2

Схема ведомости вычисления азимута направления

КП	$z_1\, z_2\, \Delta A_1\, \Delta t_1\, \delta$	$n\, k\, f\, q_2\, \varphi$	$A_1\, N_1\, M_N$	
КЛ	$z_3\, z_4\, \Delta A_2\, \Delta t_2\, \delta$	$n'\, k'\, f'\, q_2'\, \varphi$	$A_1'\, N_3\, M_N$	$M_{N\text{ср}}\, N_0\, A_{\text{астр}}$

Предлагаемый способ позволит шире внедрить определения астрономических азимутов направлений в практику топографических и прикладных геодезических работ.