

Предрасчет точности измерений астрономической рефракции вблизи горизонта
 Н.Н. Редичкин, И.Н. Редичкин
 (Ростовский государственный строительный университет, г. Ростов-на-Дону)

Предрасчет точности работ при определении углов астрономической рефракции (r_a) и ее аномалий вблизи горизонта измерительным методом можно выполнить на основании формул (1, 2, 3, 4), известных нам из работ [1, 2]:

$$r_a = z - \zeta, \quad (1),$$

где ζ — измеренное зенитное расстояние светила;

z — свободное от влияния рефракции зенитное расстояние светила, которое находят из решения параллактического треугольника $PZ\sigma$ (полюс-зенит-светило).

$$\left. \begin{aligned} z &= a \operatorname{arccos}(\cos \delta \sin \alpha + \sin \delta \cos \alpha \cos t); \\ t &= s - \alpha; \quad s = T + u; \\ u &= u_1 + \omega(T - T_1) + 0.02^s \operatorname{tg} \zeta; \\ \omega &= \frac{u_2 - u_1}{(D_2 - D_1)^h}; \quad u_1 = s_1 - T_1; \quad u_2 = s_2 - T_2; \\ s_1 &= S_0 + (D_1 - (n+1)^h) + \mu(D_1 - (n+1)^h) + \lambda; \\ s_2 &= S_0 + (D_2 - (n+1)^h) + \mu(D_2 - (n+1)^h) + \lambda; \end{aligned} \right\} \quad (2),$$

где α — прямое восхождение светила, выбираемое из каталога;

D — местное декретное время;

s, T, u — местное звездное время, отсчет по хронометру и поправка хронометра в момент наблюдений светила, соответственно;

$D_i; u_i; s_i; T_i$ — величины, полученные в моменты приема сигналов точного времени;

$\mu(D_i - (n+1)^h)$ — поправка за переход от среднего времени к звездному,

$$\left(\mu = \frac{1}{365.25} \right);$$

n, ω — номер часового пояса места наблюдений и ход хронометра соответственно;

S_0 — звездное время в 0^h всемирного;

$0.02^s \operatorname{tg} \zeta$ — поправка за суточную абберацию;

λ — долгота места наблюдений.

$$z = a \operatorname{arccos} \left(\frac{\sin \delta \sin \alpha + \cos \delta \cos \alpha \cos t}{1 - s^2 \operatorname{tg}^2 \zeta} \right) \quad (3),$$

$$z = a \operatorname{arccos} \left(\frac{\cos \delta \sin \alpha}{\cos \delta \sin \alpha + \sin \delta \cos \alpha \cos t} \right) \quad (4),$$

где φ - широта пункта наблюдений, δ - склонение светила, A — азимут светила.

Дифференцируя формулу (1) и переходя к средним квадратическим ошибкам (СКО), найдем:

$$m_{r_a} = \sqrt{m_z^2 + m_\zeta^2}, \quad (5),$$

где m_ζ - СКО измерений зенитных расстояний небесных светил;

m_z - СКО вычислений (неискаженных рефракцией) зенитных расстояний небесных светил.

Выполним анализ формулы (5). Из этой формулы видно, что величина m_{r_a} зависит как от инструментальной точности применяемого способа измерений, так и от точности координат пунктов при вычислении z по (2, 3, 4). Точность определений координат пункта зависит от условий работ. Если работы выполняются на стационарном пункте (ФАГС), то координаты известны с высокой точностью. Если работы выполняются в произвольном пункте, в условиях кратковременной экспедиции, то неизвестные координаты места наблюдений необходимо определить в минимально короткие сроки с точностью, приемлемой для выполнения измерений r_a вблизи горизонта.

Учитывая эти факторы и анализируя, например, работы [3, 4] принимаем следующие характеристики СКО, влияющих на величину m_{r_a} :

- точность широты и долготы пункта характеризуется следующими СКО:

на пунктах ФАГС: $m_\varphi = \pm 0,3''$; $m_\lambda = \pm 0,03 = \pm 0,45''$;

на полевом (экспедиционном) пункте: $m_\varphi = \pm 1,0''$; $m_\lambda = \pm 1,5''$;

- точность интерполирования экваториальных координат звезд из каталога: $m_\delta \approx m_\alpha = \pm 0,3''$

- точность измерений часового угла и азимута составляет $m_t = \pm 1,5''$; $m_A = \pm 2,0''$, соответственно.

С учетом вышеперечисленных ошибок и полагая действие каждой из них случайным и независимым, вычислим СКО определения z – зенитного расстояния светила, неискаженного рефракцией:

- для способа «часового угла», формула (2):

$$m_z^t = \sqrt{m_\varphi^2 + m_\lambda^2 + m_\delta^2 + m_t^2} = \pm 1,6'' \text{ - на пункте ФАГС;}$$

$$m_z^t = \sqrt{m_\varphi^2 + m_\lambda^2 + m_\delta^2 + m_t^2} = \pm 2,4'' \text{ - на полевом пункте;}$$

- для азимутального способа, формулы (3, 4):

$$m_z^A = \sqrt{m_\varphi^2 + m_\lambda^2 + m_\delta^2 + m_A^2} = \pm 2,0'' \text{ - на пункте ФАГС;}$$

$$m_z^A = \sqrt{m_\varphi^2 + m_\lambda^2 + m_\delta^2 + m_A^2} = \pm 2,3'' \text{ - на полевом пункте.}$$

Полученные СКО характеризуют точность определений z . Для дальнейших расчетов по формуле (5) необходимо также определить m_ζ – точность измерения зенитного расстояния светила.

На первом этапе исследований найдем m'_ζ , т.е. инструментальную СКО измерения зенитного расстояния светила.

Величину m'_ζ определяют следующие СКО (применительно к теодолиту (ОТ – 02м) [5]:

- визирование на удаленную точку $m_{\text{виз}} = \pm 1,0''$ (такая точность обусловлена формулой Нетцли) [5]:

$$m_{\text{виз}} = \frac{6''}{\sqrt{\Gamma}}, \text{ где } \Gamma = 36 \text{ крат – увеличение трубы);}$$

- определение места зенита (M_z) [5]: $m_z = \pm 2,0''$;

- погрешность хода винтов и определения рена: $m_\Delta = \pm 1,5''$.

Полагая влияние перечисленных погрешностей случайным и независимым, найдем:

$$m'_\zeta = \sqrt{m_g^2 + m_M^2 + m_\Delta^2} = \pm 2,7''.$$

Все, полученные выше, данные были использованы при выполнении расчетов по формуле (5). Результаты вычислений представлены в табл. 1.

Таблица 1

Пункт ФАГС						Полевой пункт					
Способ «часового угла»			Азимутальный Способ			Способ «часового угла»			Азимутальный Способ		
m_z	m'_ζ	m_{r_a}	m_z	m'_ζ	m_{r_a}	m_z	m'_ζ	m_{r_a}	m_z	m'_ζ	m_{r_a}
$\pm 1,6''$	$\pm 2,7''$	$\pm 3,1''$	$\pm 2,0''$	$\pm 2,7''$	$\pm 3,4''$	$\pm 2,4''$	$\pm 27''$	$\pm 3,6''$	$\pm 2,3''$	$\pm 2,7''$	$\pm 3,5''$

Из табл. 1 видно, что точность азимутального способа измерений r_a вблизи горизонта практически не зависит от того, что точность определения широты полевого пункта ($m_\varphi = \pm 1,0''$) и широты стационарного пункта ($m_\varphi = \pm 0,3''$) отличаются на значительную величину.

Анализ табл. 1 позволяет также сделать вывод, что способы «азимутальный» и «часового угла» практически (по точности определения r_a) равнозначны, если измерения выполняют на полевом пункте.

Однако, применение способа «часового угла» дает результаты, которые для полевых условий не соответствуют точности при стационарных условиях на величину $\Delta m_{r_a}^t = \pm 0,5''$ или 14% величины m_{r_a} .

Таковыми расхождениями можно пренебречь, если учитывать то, что на $\zeta > 80^\circ$ возникают аномалии рефракции, которые могут достигать величины $2 - 3'$ и более.

Этот вывод позволяет считать, что при исследовании рефракции вблизи горизонта можно применять различные способы измерительного метода. Координаты пункта при этом достаточно знать со средней квадратической погрешностью $m_\varphi \approx m_\lambda \approx \pm 1,0''$.

В табл. 1 величина m_{r_a} обусловлена инструментальными погрешностями и погрешностями определения координат пункта наблюдений. Однако, на величину m_{r_a} существенное влияние оказывают также такие факторы, как дрожание изображения и атмосферная дисперсия.

Ошибки в положении светил из-за дрожания изображения (m_d) зависят от зенитного расстояния. Их можно приближенно оценить по формуле И.Г. Колчинского [6]:

$$m_d = \pm 0,31'' \sqrt{s} \epsilon_\zeta \quad (6).$$

Ошибки измерений ζ , вызванные атмосферной дисперсией (m_d) можно примерно оценить по данным, полученным в работах [6, 7], с учетом того, что «для уменьшения влияния атмосферной дисперсии инструмент диафрагмировался так, чтобы дифракционная картина получалась наиболее четкой» [7].

Значения m_d , вычисленные по (6) и m_d , полученные в работе [7], приведены в табл. 2.

Используя для инструментальных ошибок данные ($m'_\zeta = \pm 2,7''$), приведенные в табл. 1, и, считая действие m'_ζ , m_d и m_D случайным и независимым, получим m_ζ - СКО измеренного зенитного расстояния светила.

$$m_\zeta = \sqrt{m'_\zeta{}^2 + m_d^2 + m_D^2}. \quad (7).$$

Результаты вычислений m_ζ по формуле (7) приведены в табл. 2.

Таблица 2

ζ	80^0	85^0	88^0	89^0	$89,5^0$	$89,8^0$
m_d	0,74"	1,05"	1,70"	2,35"	3,32"	5,25"
m_D	1,20	1,30	1,40	2,0	2,60	3,50
m_ζ	3,05	3,18	3,48	4,11	5,01	6,86

По данным табл. 1 и табл. 2, выполним расчеты и найдем m_{r_a} по формуле (5). В зависимости от величины ζ получим следующие (табл. 3) значения СКО определения r_a измерительным методом.

Таблица 3

ζ		80^0	85^0	88^0	89^0	$89,5^0$	$89,8^0$
Пункт ФАГС	$m_{r_a}^t$	3,4"	3,6"	3,8"	4,4"	5,2"	7,0"
	$m_{r_a}^A$	3,6"	3,8	4,0	4,6	5,4	7,1
Полевой Пункт	$m_{r_a}^t$	3,9"	4,0	4,2	4,8	5,6	7,3
	$m_{r_a}^A$	3,8"	3,9	4,2	4,8	5,5	7,2

В таблице 3 величины $m_{r_a}^t$ и $m_{r_a}^A$ - это СКО определения астрономической рефракции вблизи горизонта способами «часового угла» и «азимутальным», соответственно.

Из анализа табл. 3 установлено:

- способы измерительного метода определений r_a вблизи горизонта равнозначны по точности и могут применяться для выполнения работ как на пунктах ФАГС, так и в пунктах экспедиционных, полевых работ;
- измерительный метод позволяет определять углы r_a со СКО $m_{r_a} = \pm 3 - 4''$ на зенитных расстояниях $\zeta \leq 88^0$;
- на зенитных расстояниях $\zeta > 88^0$ существенное влияние оказывают дрожание изображения и дисперсия, поэтому значения m_{r_a} достигают величины 7 и более секунд.

Литература

1. Куштин И.Ф. Методы определения углов рефракции и поправок в дальность.- В сб.: Геодезия и фотограмметрия, изд. РИСИ, Ростов-на-Дону, 1986.- с.3-15.
2. Халхунов В.З. Курс сферической астрономии.- М.: Недра, 1972.- 304с.
3. Инструкция о построении государственной геодезической сети СССР.- М.: Недра, 1966.- 341с.
4. Уралов С.С. Общая теория методов геодезической астрономии.- М.: Недра, 1973.- 271с.

5. Елисеев С.В. Геодезические инструменты и приборы.- М.: Гедезиздат, 1959.- 480с.
6. Колчинский И.Г. Два метода определения атмосферной дисперсии.- АН СССР. *Астрономический журнал*. Т. XXVI. №1, 1949.- с. 49-55.