УДК 528.28

В. А. КОВАЛЕНКО, М. П. КУЛИНИЧ

К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПОЛОЖЕНИЯ ЗВЕЗДЫ НА АСТРОНЕГАТИВЕ

Для определения времени, широты и азимута астрономическими методами необходимо в фиксированный момент времени иметь горизонтные и экваториальные координаты небесного светила. Если наблюдения проводятся фотографическим методом [1], то на фотопленке получают изображение неподвижной сетки нитей и прерывистого следа звезды. Время экспозиции регистрируется с помощью хронографа или хронорегистратора [3].

Измерив на стереокомпараторе или другом приборе прямоугольные координаты точек следа и точки O пересечения вертикальной и горизонтальной нитей, находят их разности и получают координаты x и y точек следа звезды в системе измерительного прибора, начало которой совмещено с точкой O.

Дальнейшая обработка негатива заключается в приведении всех моментов экспозиций к одной точке негатива, положение которой можно определить в горизонтной и экваториальной системах сферических координат различными способами. Один из

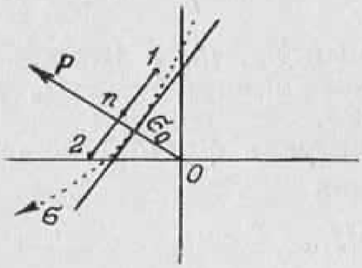

Рис. 1. Схема негатива.

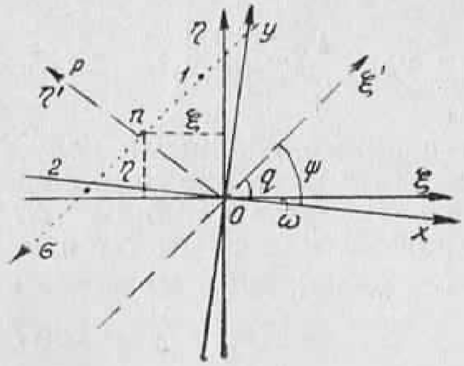

Рис. 2. Взаимное расположение координатных систем.

них описан в [2]. В этом способе моменты экспозиций приводятся к кругу склонений звезды $O\sigma_0$ (рис. 1), определяется расстояние $O\sigma_0$ и склонение точки O, горизонтные координаты которой считаются известными. Таким образом, рассмотренный способ предполагает редуцирование экваториальных координат к точке с известными горизонтными координатами.

В ряде случаев более удобен прием редуцирования горизонтных координат точки O к положению звезды в экваториальных координатах. Рассмотрим его подробнее.

В качестве исходных данных, как и в первом способе, принимаем координаты x_i, y_i опорных точек *1*, *2* и соответствующие им моменты времени T_1 и T_2. Опорные точки определяем следующим образом:

находим визуально ближайшую к кругу склонений $O\sigma_0$ точку следа и принимаем ее за точку симметрии;

по обе стороны от точки симметрии выбираем одно и то же число точек следа (четыре—шесть);

вычисляем среднее арифметическое из моментов наблюдений и измеренных координат первой половины точек следа, включая точку симметрии, и получаем T_1, x_1, y_1;

для второй половины следа звезды так же находим T_2, x_2, y_2.

Экваториальные координаты обеих опорных точек будут иметь значения $\alpha = \alpha_в$ и $\delta = \delta_в + \varepsilon$, где $\alpha_в$, $\delta_в$ — видимые координаты звезды в средний момент ее наблюдения; $\varepsilon = \dfrac{15^2 (T_2 - T_1)^2}{32\rho''} \sin 2\delta$ — поправка, учитывающая кривизну суточной параллели при объединении в среднее арифметическое прямоугольных координат точек измеряемого отрезка этой параллели.

Далее следуют вычисления, выполнять которые рекомендуется в такой последовательности.

1. Находим

$$T_n = \frac{1}{2}(T_2 + T_1), \quad \Delta T = T_2 - T_1, \quad x_n = \frac{1}{2}(x_2 + x_1),$$

$$y_n = \frac{1}{2}(y_2 + y_1), \quad \Delta x = x_2 - x_1, \quad \Delta y = y_2 - y_1.$$

Точка n с прямоугольными координатами x_n, y_n и моментом наблюдения T_n имеет экваториальные координаты $\alpha_n = \alpha_в$ и $\delta_n = \delta_в + \Delta\delta$, где $\Delta\delta = 3\varepsilon = 1{,}02 \cdot 10^{-4}\, \Delta T^2 \sin 2\delta$.

2. Вычисляем $\operatorname{tg}\psi = \Delta y/\Delta x$ и значение угла ψ. Определяем расстояние $L = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}$ и масштаб негатива

$$M'' = 15\Delta T \cos\delta/L.$$

3. Пользуясь формулой $\sin q = \cos\varphi \sin t/\sin z$, где φ — широта; t — часовой угол; z — зенитное расстояние, находим параллактический угол q и разность $\omega = \psi - q$.

4. Выбираем горизонтальную систему прямоугольных координат $O\xi\eta$, совмещая ось $O\eta$ с направлением отвесной линии (рис. 2). Поворотом осей системы Oxy на угол ω получаем горизонтальные координаты ξ_n, η_n точки n:

$$\xi_n = x_n \cos\omega + y_n \sin\omega, \quad \eta_n = -x_n \sin\omega + y_n \cos\omega. \tag{1}$$

5. Вычисляем координаты точки n в угловой мере $\Delta A'' = M \cdot \xi_n$, $\Delta z'' = M \cdot \eta_n$, а затем азимут и зенитное расстояние $A_n = A_0 + \Delta A$, $z_n = z_0 + \Delta z$, где A_0 и z_0 — координаты точки O.

6. Имея T_n, α_n, δ_n, A_n или z_n, определяем широту, долготу и азимут направления известными в геодезической астрономии приемами.

При обработке наблюдений звезд пар Цингера, Певцова и в других случаях может возникнуть необходимость вычисления моментов прохождения звезд через вертикал и альмукантарат точки O.

Для этого вычисляем горизонтальные координаты ξ_i и η_i опорных точек *1* и *2*, применив (1). Определяем скорости изменения этих координат, а затем и моменты прохождения светила через вертикал и альмукантарат точки O: $V_\xi = (\xi_2 - \xi_1)/\Delta T$, $V_\eta = (\eta_2 - \eta_1)/\Delta T$, $T_A = T_n - \Delta T_A$, $T_z = T_n - \Delta T_z$. Здесь $\Delta T_A = \xi_n/V_\xi$; $\Delta T_z = \eta_n/V_n$.

Формулы для вычисления редукций ΔA, Δz, ΔT_A, ΔT_z можно представить в другом, унифицированном, виде. Воспользовавшись (1) для вычисления ξ_n и η_n, принимая во внимание, что $\omega = \psi - q$, и учитывая, что $\cos\psi = \dfrac{\Delta x}{\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}}$, $\sin\psi = \dfrac{\Delta y}{\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}}$, получаем

$$\Delta A'' = 15\,(T_2 - T_1)^s \cos\delta\,(-\,a_n \cos q + b_n \sin q), \tag{2}$$

$$\Delta z'' = -\,15\,(T_2 - T_1)^s \cos\delta\,(a_n \sin q + b_n \cos q). \tag{3}$$

Здесь

$$a_n = \frac{x_n\cdot\Delta x + y_n\cdot\Delta y}{\Delta x^2 + \Delta y^2}\,; \quad b_n = \frac{x_n\cdot\Delta y - y_n\cdot\Delta x}{\Delta x^2 + \Delta y^2}\,. \tag{4}$$

Далее записываем $\Delta T_A = \frac{\xi_n}{\xi_2 - \xi_1}(T_2 - T_1)$. С помощью (2) находим

$$\frac{\xi_n}{\xi_2 - \xi_1} = \frac{-\,a_n \cos q + b_n \sin q}{-\,a_2 \cos q + b_2 \sin q + a_1 \cos q - b_1 \sin q}\,,$$

где a_1, a_2, b_1, b_2 получаем по (4), заменив индекс n индексами *1* и *2*.

Нетрудно показать, что $a_1 - a_2 = 1$, $b_2 = b_1$.
Поэтому

$$\Delta T_A = (-a_n + b_n \operatorname{tg} q)\,(T_2 - T_1). \tag{5}$$

Подобным образом

$$\Delta T_z = -\,(a_n + b_n \operatorname{ctg} q)\,(T_2 - T_1). \tag{6}$$

Исходя из (2), (3), (5), (6), устанавливаем зависимость определяемых значений от погрешностей измерения негатива. Функциями непосредственно измеренных величин являются коэффициенты a_n и b_n. Определим средние квадратические погрешности этих функций. Логарифмируя, а затем дифференцируя (4) и переходя к средним квадратическим погрешностям, имеем

$$m_a^2 = \frac{m_k^2}{(\Delta x^2 + \Delta y^2)^2}\,[x_2^2 + x_1^2 + y_2^2 + y_1^2 + 8a^2\,(\Delta x^2 + \Delta y^2)],$$

$$m_b^2 = \frac{m_k^2}{(\Delta x^2 + \Delta y^2)^2}\,[x_2^2 + x_1^2 + y_2^2 + y_1^2 + 8b^2\,(\Delta x^2 + \Delta y^2)]. \tag{7}$$

Здесь m_k — средняя квадратическая погрешность определения одной из координат точек *1* или *2*, получаемой как среднее арифметическое четырех—шести ее значений. Установлено, что координаты точек следа определяются с погрешностью $m = 0{,}012$ мм.

Тогда $m_k = m/\sqrt{5} \approx 0{,}005$ мм. Имея m_a и m_b, можно судить о точности определяемых по негативу значений. Например, $m^2_{\Delta T_z} = (m_a^2 + m_b^2 \operatorname{ctg}^2 q)\,(T_2 - T_1)^2$.

Ввиду симметрии точек *1* и *2* относительно круга склонений $O\sigma_0$, являющегося осью ординат экваториальной системы (см. рис. 1), коэффициент a_n будет не более 0,05.

Если след звезды близок к точке O, то и коэффициент b_n будет мал (около 0,1). Поэтому во многих случаях $m_a = m_b = m_H$.

Следовательно,

$$m_{\Delta T_z} = \frac{m_H}{\sin q}(T_2 - T_1),$$

$$m_{\Delta T_A} = \frac{m_H}{\cos q}(T_2 - T_1). \tag{8}$$

Формулы (8) можно применить для оценки момента прохождения звезд через вертикал и альмукантарат точки O при фотографическом методе наблюдений.

Для конкретного случая наблюдений пар Цингера $m_H = 0{,}0006$. Для среднего значения угла $q = 45^\circ$ $m_{\Delta T_z} = m_{\Delta T_A} \approx 0{,}02^s$, т. е. практически такое же значение, как и при визуальных наблюдениях с контактным микрометром ($m_T = 0{,}025^s$).

Список литературы: 1. *Коваленко В. А., Колгунов В. М.* Об опытных астрономических наблюдениях фотографическим способом. — Геодезия и картография, 1976, № 3. 2. *Коваленко В. А.* Об обработке фотографических наблюдений одной звезды. — Геодезия, картография и аэрофотосъемка, 1981, вып. 34. 3. *Колгунов В. М., Гончаренко Ю. Я.* Полевой программный хронорегистратор для астрономических наблюдений фотографическим способом. — Геодезия и картография, 1977, № 8.

Статья поступила в редколлегию 14. 08. 84