

ANALYSIS OF INACCURACY OF THE DIRECT MEASUREMENTS OF THE POSITIONS OF COSMIC OBJECTS АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТЕЙ ПРЯМЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ПОЛОЖЕНИЙ КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Paltsev N.G., Kolesnik S.Ya.

Astronomical Observatory, Odessa National University
T.G.Shevchenko Park, Odessa 65014 Ukraine, *astro@paco.odessa.ua*

ABSTRACT. On base of the analysis to coordinate information, got at observations of the positions of the stars on cinema-theodolite KT-50, cross bar-beam which is not allowed, is designed algorithm and is organized a study of the instrument. The Certain values, characterizing coordinate system KT-50: – a zero-points of the scales of the azimuth and heights, of the collimation, slopping to horizontal axis, slopping to vertical axis and its azimuth. The Designed algorithm of the calculation of the adjustments counting out the azimuth and heights as of processing the frames CCD-observations.

Key words: system coordinate, collimation, the zero-points of the scales.

При оптических наблюдениях координаты космических объектов получают путем регистрации их видимых положений на небесной сфере в некоторые фиксированные моменты времени. В зависимости от способов получения различают прямые и косвенные измерения положений космических объектов. При прямых измерениях данные получают непосредственно с лимбов угломерных инструментов или датчиков углов, а при косвенных – путем обработки фото-, теле- или ПЗС- изображений КО на фоне звезд. При прямых измерениях положений КО с использованием оптических методов, как правило, имеют место следующие виды ошибок (Подобед, 1962):

- 1) инструментальные ошибки;
- 2) ошибки наведения и гидрирования;
- 3) ошибки, связанные с регистрацией данных наблюдений (аппаратурные ошибки).

Инструментальные ошибки обусловлены наличием неустраняемых технических факторов, присущих данному инструменту. Такими факторами являются коллимация, наклоны горизонтальной и вертикальной осей, люфты и т.п. К инструментальным ошибкам также можно отнести погрешности

положений начальных штрихов (нуль-пунктов) шкал соответствующих угломерных устройств. К аппаратурным ошибкам следует относить ошибки ввода, преобразования и отображения координатно-временной информации, а также сбои.

Нуль-пункты шкал азимута и высоты

Положения начальных штрихов шкал азимута A_0 и высоты H_0 определяются из массивов невязок $\Delta A = (O-C)_A = A_o - A_c$ и $\Delta h = (O-C)_h = h_o - h_c$ как

$$A_0 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (A_o - A_c), \quad H_0 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (h_o - h_c), \quad (1)$$

где A_o, h_o – наблюдаемые значения азимута и высоты звезды; A_c, h_c – значения азимута и высоты той же звезды, полученные переводом ее каталожного положения на момент наблюдения с учетом прецессии, нутации, годичной и суточной аберраций и т.п.; n – число элементов массивов A_o, h_o, A_c, h_c .

Считая A_c, h_c точными, отклонения невязок $\delta A, \delta h$ от вычисленных нуль-пунктов A_0 и H_0 можно найти как $\delta A = \Delta A - A_0, \quad \delta h = \Delta h - H_0$.

Наклон платформы инструмента (высота)

В сферическом треугольнике $A_c B \Omega$ (Рис. 1): $A_c B = \delta h$ – поправка высоты; i' – наклон платформы; Ω – азимут узла; A_i – азимут наклона.

Обозначив дугу $B\Omega = u$, запишем равенства

$$\sin u \cdot \cos i' = \cos \delta h \cdot \sin(A_c - \Omega), \quad (2)$$

$$\sin u \cdot \sin i' = \sin \delta h,$$

преобразуя которые, получим выражение

$$\operatorname{tg} \delta h = \sin A_c \cdot \cos \Omega \cdot \operatorname{tg} i' - \cos A_c \cdot \sin \Omega \cdot \operatorname{tg} i', \quad (3)$$

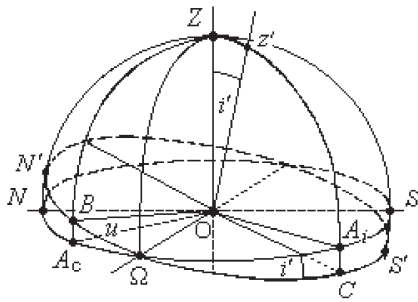


Рис. 1:

описывающее наклон и ориентацию платформы. Обозначая $X = \cos \Omega \cdot \operatorname{tg} i'$, $Y = -\sin \Omega \cdot \operatorname{tg} i'$, получим систему уравнений

$$X \cdot \sin A_{cj} + Y \cdot \cos A_{cj} = \operatorname{tg} h_j, \quad j = 1, \dots, n. \quad (4)$$

позволяющих найти положение узла Ω и наклона платформы i' ,

$$\Omega = \operatorname{arctg} \left(\frac{X}{-Y} \right), \quad i' = \operatorname{arctg} \left(\sqrt{X^2 + Y^2} \right), \quad (5)$$

а также поправки высоты за наклон платформы

$$\delta h_j = \operatorname{arctg} [\operatorname{tg} i' \cdot \sin(A_{cj} - \Omega)]. \quad (6)$$

Наклон платформы инструмента (азимут)

В сферическом треугольнике AZz' (Рис. 2): $R\Omega L$ – плоскость истинного горизонта; i' – угол наклона платформы инструмента, (дуга Zz'); i^* – угол наклона горизонтальной оси инструмента, вызываемый наклоном его платформы (дуга Zp , лежащая в плоскости RZL); $A_i = \Omega - 90^\circ$ – истинный азимут нормали наклоненной платформы; A' – искаженное значение азимута объекта.

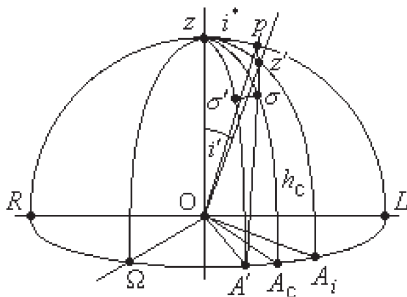


Рис. 2:

Наклон платформы инструмента также влияет и на точность отсчетов азимута наблюдаемого объек-

та. Из сферического треугольника AZz' следует:

$$\cos(A'z') = \sin i' \cdot \cos(A' - A_i), \quad (7)$$

$$\sin i^* = \sin i' \cdot \frac{\sin(A' - A_i)}{\sin(A'z')},$$

Поправка азимута за наклон платформы инструмента будет равна

$$\delta A_{i^*} = A' - A_c = i^* \operatorname{tg} h_c. \quad (8)$$

Коллимация

Коллимация вызывается неперпендикулярностью визирной линии $O\sigma$ и горизонтальной оси инструмента ROL . В этом случае угол между визирной линией и горизонтальной осью инструмента равен $90^\circ + c$, где c – коллимация.

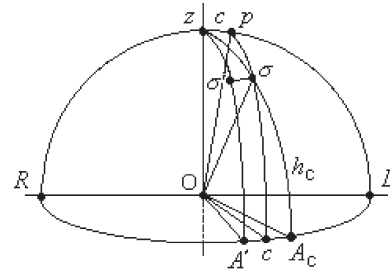


Рис. 3:

Коллимация влияет на точность измерения азимута наблюдаемого объекта, искажая отсчеты, не изменяя при этом отсчеты зенитных расстояний (высот). В астрометрии ошибка азимута, вызываемая коллимацией (Рис. 3), определяется как

$$\delta A_c = A' - A_c = \frac{c}{\cos h_c},$$

где A' – искаженное значение азимута объекта σ ; A_c , h_c – точные азимут и высота объекта.

Наклон горизонтальной оси

В астрометрии ошибка отсчетов азимута, обусловленная наклоном горизонтальной оси инструмента (Рис. 5) определяется формулой:

$$\delta A_{i_2} = A' - A_c = i_2 \cdot \operatorname{tg} h_c.$$

Из приведенных формул видно, что погрешности отсчетов азимута, вызываемые коллимацией и наклоном горизонтальной оси, зависит от высоты наблюдаемых объектов над горизонтом h_c . Для азимутальных инструментов, не допускающих перекадку, знаки ошибок азимута δA_c и δA_{i_2} меняться не

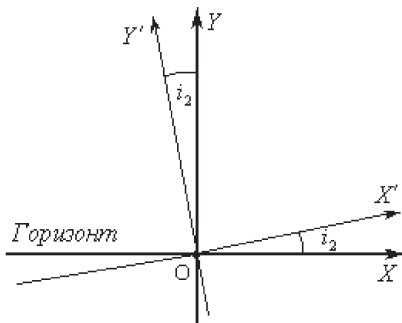


Рис. 4: Схематичное представление наклона горизонтальной оси инструмента: OX – линия истинного горизонта; OX' – наклоненная горизонтальная ось инструмента; OY' – визирная линия; i_2 – угол наклона горизонтальной оси инструмента.

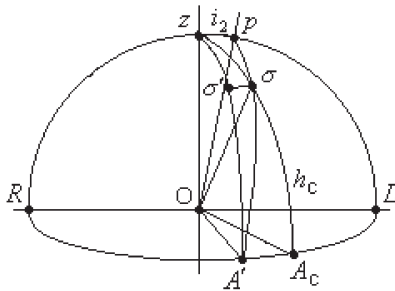


Рис. 5:

будут. Таким образом, общая ошибка по азимуту $\Delta A = A_o - A_c$ будет равна

$$\Delta A = A_{02} + \delta A_c + \delta A_{i_2} + \delta A_{i^*}. \quad (9)$$

После того, как наклон платформы i и соответствующие ему поправки δA_{i^*} определены, нуль-пункт A_{02} , коллимацию c и наклон горизонтальной оси инструмента i_2 можно найти из уравнений вида

$$A_{02} + \delta A_c + \delta A_{i_2} = \Delta A - \delta A_{i^*}, \quad (10)$$

которые, с учетом приведенных выше формул, будут иметь вид

$$c + A_{02} \cdot \cos h_c + i_2 \cdot \sin h_c = \Delta A \cdot \cos h_c - i^* \cdot \sin h_c. \quad (11)$$

Решив эту систему уравнений методом наименьших квадратов, найдем величины c , A_{02} , i_2 , позволяющие вычислить поправки азимута δA . После этого уточненные координаты визирной линии инструмента можно найти как

$$A_c = A_o - \Delta A, \quad h_c = h_o - \Delta h.$$

Результаты исследования наблюдательного инструмента КТ-50

С помощью приведенного алгоритма было проведено исследование координатной системы наблюдательного инструмента кинотеодолита КТ-50, перекладка которого не допускается. Обработке и анализу были подвергнуты данные более 300 позиционных наблюдений звезд, полученные на этом инструменте посредством прямых измерений. Невязки $\Delta A = (O - C)_A$ и $\Delta h = (O - C)_h$ этих наблюдений приведены на Рис. 6.

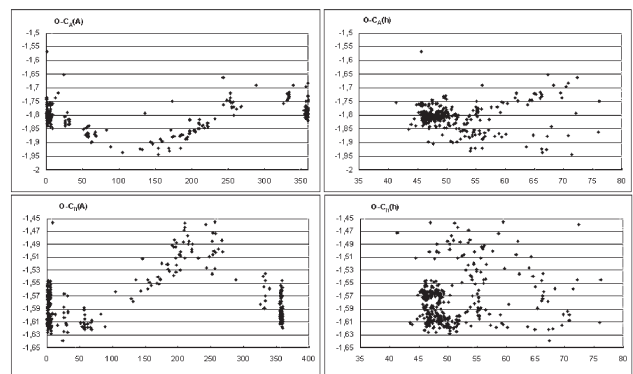


Рис. 6: Характер невязок позиционных наблюдений звезд, полученных на КТ - 50.

В результате проведенных вычислений были определены следующие величины, характеризующие координатную систему наблюдательного инструмента кинотеодолита КТ-50:

- нуль-пункты шкал азимута и высоты A_0 и H_0 :
 $A_0 = -1.8058 \pm 0.0025$ град.;
 $H_0 = -1.5745 \pm 0.0022$ град.;
- нуль-пункт шкалы азимута:
 $A_{02} = -1.8864 \pm 0.0437$ град.;
- коллимация: $c = 0.0072 \pm 0.0027$ град.;
- наклон горизонтальной оси:
 $i_2 = -0.0405 \pm 0.0064$ град.;
- наклон платформы и положение узла, град.:
 $i' = 0.0568 \pm 0.0078$; $\Omega = 163.8433 \pm 0.3962$;
- азимут наклона вертикальной оси инструмента:
 $A_i = 253.8433 \pm 0.3962$ град.

Найденные величины позволяют вычислять поправки азимута ΔA и высоты Δh с точностью $\pm 0.0017 \div 0.0022$ град. для азимута A и $\pm 0.0015 \div 0.0017$ град. для высоты h .

После учета поправок, компенсирующих инструментальные ошибки, невязки $\Delta A = (O - C)_A$ и $\Delta h = (O - C)_h$ наблюдений этих же звезд имеют вид (см. Рис. 7).

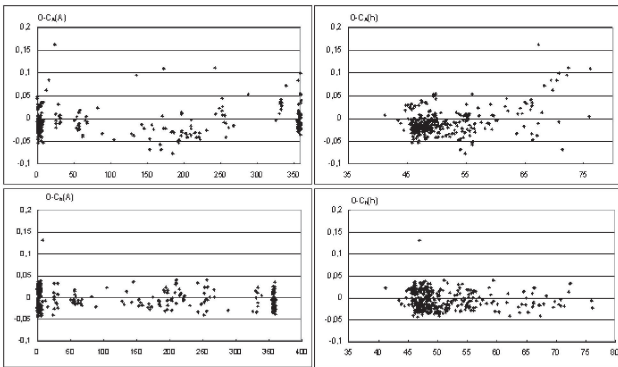


Рис. 7: Невязки позиционных наблюдений звезд, после исправления инструментальных ошибок.

Учет ошибок гидирования

Все рассмотренные выше вычисления поправок азимута и высоты касались уточнения положения оптической оси инструмента (оптического центра). Однако, как известно из практики, из-за ошибок наведения и гидирования наблюдаемое положение КО практически никогда не совпадает с положением оптического центра, см. Рис. 7.

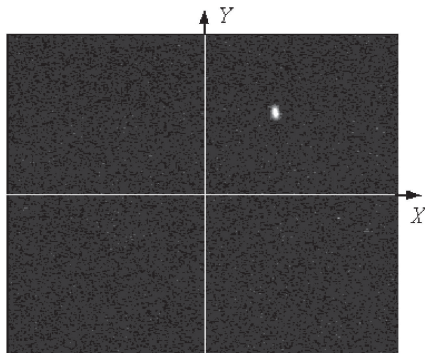


Рис. 8: Одно из положений ИСЗ относительно креста нитей (центра кадра).

Положение ИСЗ в поле зрения инструмента характеризуется его координатами относительно оптического центра поля, которые могут быть определены при обработке фотографических, телевизионных или ПЗС-наблюдений КО.

Авторами разработана процедура вычисления поправок для учета смещения наблюдаемого КО относительно центра кадра, применяемую для обработки ПЗС-наблюдений ИСЗ, получаемых на инструментах с азимутальной монтировкой при малых угловых размерах поля (что ограничивает попадание звезды в кадр).

В данной процедуре предполагается, что оси кадра OX и OY совпадают с направлением осей горизонтальной системы координат, т.е. ось OX – по

возрастанию азимута, а ось OY – по возрастанию высоты. Предполагается также, что растровых искажений нет. При наличии растровых искажений необходимо применять коррекцию растра.

Пусть x, y – координаты КО в пикселах в прямоугольной системе координат, связанной с центром кадра, оси OX и OY которой направлены по возрастанию азимута и высоты, Рис. 8.

Зная угловые размеры кадра по высоте (ось Y) ph и по азимуту (ось X) pA и размеры кадра в пикселах Rh и RA , определим коэффициенты $M_h = ph/Rh$ и $M_A = pA/RA$ для перехода от пикселей к угловой мере. Угловые смещения КО в поле кадра будут равны: $\delta\eta = y \cdot M_h$ по оси y и $\delta\zeta = x \cdot M_A$ по оси x .

Поправка высоты всегда равна поправке поля кадра $\delta h = \delta\eta$, следовательно,

$$h_k = h_a + \delta h = h_a + y \cdot M_h,$$

где h_a – угол места (высота) центра кадра.

Поправка азимута, зависящая от высоты, находится из соотношений, получаемых из сферического треугольника, вершинами которого являются точка зенита, центр кадра и наблюдаемый КО (Рис. 8):

$$\cos \delta\eta \cdot \cos \delta\zeta = \sin h_a \cdot \sin h_k + \cos h_a \cdot \cos h_k \cdot \cos \delta A, \quad (12)$$

$$\delta A = \arccos \left(\frac{\cos \delta\eta \cdot \cos \delta\zeta - \sin h_a \cdot \sin h_k}{\cos h_a \cdot \cos h_k} \right).$$

При достаточно больших полях, когда в кадр попадают легко отождествляемые звезды, для определения координат наблюдаемого объекта могут быть использованы косвенные методы, например, метод Тернера. В этом случае требования к ориентации осей кадра будут менее жесткими.

Литература

- Подобед В.В.: 1962, *Фундаментальная астрометрия. Определение координат звезд*, М.: Физматгиз, 340 с.
 Подобед В.В., Нестеров В.В.: 1982, *Общая астрометрия*, М.: Наука, 576 с.
 Блажко С.Н.: 1979, *Курс практической астрономии*, М.: Наука, 432 с.