

УДК 520.2.03

Н. Г. Пальцев, С. Я. Колесник

НИИ «Астрономическая обсерватория»
Одесского национального университета им. И. И. Мечникова
65014 Одесса, парк Шевченко
astro@paco.odessa.ua

Исследование координатной системы астрономических инструментов, не допускающих перекладку

На основе анализа координатной информации, получаемой при наблюдениях положений звезд на кинотеодолите КТ-50, перекладка которого не допускается, разработан алгоритм и проведено исследование этого инструмента. Определены величины, характеризующие координатную систему КТ-50: нуль-пункты шкал азимута и высоты, коллимация, наклон горизонтальной оси, наклон вертикальной оси и его азимут. Разработан алгоритм вычисления поправок отсчетов азимута и высоты по данным обработки кадров ПЗС-наблюдений.

ДОСЛІДЖЕННЯ КООРДИНАТНОЇ СИСТЕМИ АСТРОНОМІЧНИХ ІНСТРУМЕНТІВ, ЩО НЕ ДОПУСКАЮТЬ ПЕРЕКЛАДКУ, Пальцев М. Г., Колесник С. Я. — На основі аналізу координатної інформації, отримуваної при спостереженнях положень зірок на кінотеодоліті КТ-50, перекладка якого неможлива, розроблено алгоритм і проведено дослідження цього інструмента. Визначено величини, які характеризують координатну систему КТ-50: нуль-пункти шкал азимута і висоти, колімацію, нахил горизонтальної осі, нахил вертикальної осі і його азимут. Розроблено алгоритм обчислення поправок відліків азимута і висоти за даними обробки кадрів ПЗС-спостережень.

THE INVESTIGATION OF THE COORDINATE SYSTEM OF ASTRONOMICAL INSTRUMENTS, NOT ALLOWING CROSS BAR-BEAM, by Paltsev N. G., Kolesnik S. Ya. — On the basis of the analysis of coordinate information obtained from positional observations of stars with the cinematheodolite KT-50, cross bar-beam for which is not allowed, the algorithm is developed and the investigation of the instrument is carried out. The values are determined, characterizing the coordinate system of KT-50: zero-points of the scales of azimuth and height, collimation, slopping to horizontal axis, slopping to vertical axis and its azimuth. The algorithm is developed for the calculation of the corrections for counts of azimuth and heights with the use of the results of processing of CCD-observation frames.

ОШИБКИ ПРЯМЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ПОЛОЖЕНИЙ КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Позиционные наблюдения являются основой получения координатной информации о космических объектах (КО), используемой как для изучения особенностей движения искусственных спутников Земли (ИСЗ), так и для решения важнейших геодезических, баллистических, навигационных и других задач. В настоящее время в качестве позиционных наблюдений ИСЗ широко используются оптические, радиолокационные и лазерно-дальномерные наблюдения ИСЗ.

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.

Для прямых измерений положений КО с использованием оптических методов характерны следующие виды ошибок [2]:

- 1) инструментальные ошибки;
- 2) ошибки, связанные с регистрацией данных (аппаратурные ошибки);
- 3) ошибки, связанные с наведением и гидированием.

Инструментальные ошибки обусловлены наличием неустранимых технических факторов, присущих данному инструменту (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, как правило, относятся ошибки фиксации координат и моментов времени, а также ошибки, связанные с усечением измеряемой величины, и сбои. Так как ИСЗ движутся быстро, то неточность фиксации времени может приводить к значительным погрешностям определения их положений. Так, например, при скорости ИСЗ $V = 7.5$ км/с и регистрации времени с точностью 0.001 с погрешность определения его положения составит 7.5 м, или $1.55''$ при дальности 1000 км. Эта погрешность уменьшается с увеличением расстояния до ИСЗ [2].

Округление (усечение) измеряемой величины также может приводить к значительным погрешностям. Так, например, округление отсчета угловых координат ИСЗ до 0.1° равносильно тому, что спутник при наблюдении может находиться в любой точке поля зрения инструмента, ограниченного диафрагмой радиусом $r = 3'$ [2]. Эта погрешность уменьшается с увеличением разрядности отсчета.

Инструментальные и аппаратурные ошибки отсчетов координат можно компенсировать путем учета соответствующих поправок, которые могут быть вычислены после исследования работы инструмента и аппаратных устройств по наблюдениям звезд.

Ошибки, связанные с гидированием, обусловлены тем, что при наблюдениях вместо положений КО регистрируются положения оптической оси (визирной линии, креста нитей или центра диафрагмы) инструмента. Величина этой ошибки равна удалению места ведения КО от центра креста нитей и может заметно изменяться в течение времени наблюдений. Ошибки гидирования сильно зависят от видимой скорости движения ИСЗ и обычно достигают наибольших величин при наблюдениях ИСЗ на больших угловых

высотах h , когда скорость КО по азимуту становится очень большой. Минимальной же эта ошибка становится на близких к горизонту участках наблюдаемой траектории, когда видимая скорость движения спутника мала [2]. Величина ошибки гидирования может быть определена, например, по данным обработки кадров ПЗС-наблюдений.

АНАЛИЗ И ОБРАБОТКА КООРДИНАТНЫХ ДАННЫХ

Траекторию видимого движения ИСЗ на небесной сфере можно представить выпуклой гладкой кривой, каждая точка которой в горизонтальной системе координат характеризуется моментом времени t , азимутом A и высотой h над горизонтом.

Траектория ИСЗ, построенная по наблюдательным данным, из-за наличия ошибок фиксации времени и координат будет отличаться от траектории видимого движения ИСЗ. Поэтому в полученные из наблюдений данные нужно внести поправки, компенсирующие инструментальные ошибки, ошибки регистрации и гидирования, а также сгладить их.

1. Анализ инструментальных ошибок. Как указывалось выше, инструментальные ошибки обусловлены рядом технических особенностей инструмента. Таковыми, например, являются погрешности положений начальных штрихов шкал угломерных устройств или датчиков углов, неперпендикулярность визирной линии и горизонтальной оси инструмента (коллимация), наклоны горизонтальной и вертикальной осей инструмента (наклон платформы), различные люфты и т. п.

1.1. Нуль-пункты шкал азимута и высоты первого приближения. Для наблюдательных инструментов с азимутальной монтажкой положения начальных штрихов шкал азимута A^0 и высоты (угла места) H^0 (нуль-пункты первого приближения) определяются по данным позиционных наблюдений звезд из массивов соответствующих невязок $\Delta A_i = A_{oi} - A_{ci}$ и $\Delta h_i = h_{oi} - h_{ci}$:

$$\begin{aligned} A^0 &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (A_{oi} - A_{ci}), \\ H^0 &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (h_{oi} - h_{ci}), \end{aligned} \quad (1)$$

где A_{oi} , h_{oi} — наблюдаемые значения азимута и высоты звезды, отягощенные разного рода погрешностями; A_{ci} , h_{ci} — значения азимута и высоты той же звезды, полученные переводом ее каталожного положения на момент наблюдения t_i с учетом прецессии, нутации, годичной и суточной aberrаций, а также атмосферной рефракции; n — количество измерений.

Для того чтобы существенно уменьшить зависимость H^0 от азимута, необходимо использовать большое количество положений звезд, равномерно расположенных на наблюдаемой полусфере ($0^\circ \leq A \leq 360^\circ$, $0^\circ \leq h < 90^\circ$).

Считая значения величин A_{ci} , h_{ci} точными (истинными), найдем отклонения невязок δA_i , δh_i от вычисленных нуль-пунктов A^0 и H^0 :

$$\begin{aligned} \delta A_i &= A_{oi} - A_{ci} - A^0, \\ \delta h_i &= h_{oi} - h_{ci} - H^0. \end{aligned}$$

Величины δA_i и δh_i позволяют определить среднюю квадратичную погрешность нуль-пунктов первого приближения A^0 и H^0 :

$$\sigma_A = \sqrt{\sum_1^n (\delta A_i)^2 / [n(n-1)]},$$

$$\sigma_H = \sqrt{\sum_1^n (\delta h_i)^2 / [n(n-1)]}. \quad (2)$$

Нужно отметить, что найденное таким образом значение H^0 можно использовать в дальнейших расчетах, тогда как нуль-пункт A^0 , вычисленный по формуле (1), будет содержать в себе некоторую часть ошибок из-за коллимации и наклонов горизонтальной и вертикальной осей инструмента, в связи с чем его использование не всегда приемлемо. Для большинства случаев этот нуль-пункт должен быть вычислен по другой методике.

1.2. Наклон горизонтальной платформы инструмента и его влияние на точность измеряемых координат космических объектов. Наличие зависимости поправок высоты δh от азимута A_c позволяет найти наклон платформы инструмента к истинному горизонту и ее ориентацию.

Рассмотрим сферический треугольник $A_c B \Omega$ (рис. 1), где $A_c B = \delta h$ — поправка по высоте для рассматриваемой звезды; i' — наклон платформы инструмента к истинному горизонту; Ω — азимут узла (точки, лежащей на линии пересечения истинного горизонта $N \Omega A_c S$ и плоскости платформы инструмента $N' B \Omega C S'$).

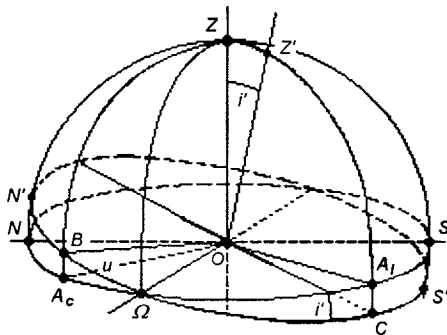


Рис. 1. К определению наклона горизонтальной платформы инструмента

Обозначив дугу $B \Omega = u$, напомним:

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

$$\sin u \cdot \sin i' = \sin \delta h. \quad (3)$$

Из этих равенств после преобразований получим выражение

$$\operatorname{tg} \delta h = \sin A_c \cos \Omega \cdot \operatorname{tg} i' - \cos A_c \sin \Omega \cdot \operatorname{tg} i', \quad (4)$$

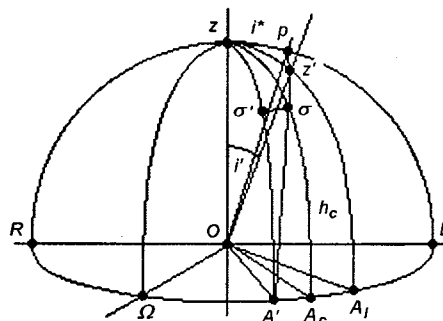
позволяющее найти наклон платформы и ее ориентацию (положение узла Ω).

Обозначив $X = \cos \Omega \cdot \operatorname{tg} i'$, $Y = -\sin \Omega \cdot \operatorname{tg} i'$, запишем выражения (4) для каждой наблюдавшейся звезды. Получим систему уравнений

$$X \sin A_{c_j} + Y \cos A_{c_j} = \operatorname{tg} \delta h_j, \quad (5)$$

$$j = 1, \dots, n,$$

Рис. 2. Влияние наклона платформы инструмента на точность измерения азимута



решая которую методом наименьших квадратов, найдем неизвестные величины X и Y . Это позволит вычислить положение (азимут) узла и наклон платформы инструмента к плоскости истинного горизонта

$$\Omega = \operatorname{arctg}\left(\frac{X}{-Y}\right);$$

$$i' = \operatorname{arctg}(\sqrt{X^2 + Y^2}) \quad (6)$$

и поправки δh_j высоты за наклон платформы

$$\delta h_j = \operatorname{arctg}(\operatorname{tg} i' \cdot \sin(A_{ej} - \Omega)). \quad (7)$$

Наклон платформы инструмента оказывает влияние также и на точность отсчетов азимута наблюдаемого объекта. Рассмотрим рис. 2, где $R\Omega LO$ — плоскость истинного горизонта для пункта O , ROL — горизонтальная ось инструмента, z — истинный зенит, zz' — дуга, соответствующая углу наклона платформы $i' = \angle zOz'$, $i^* = \angle zOp$ — угол наклона горизонтальной оси инструмента, вызываемый наклоном его платформы. Величина угла i^* не является постоянной, а зависит от истинного азимута A_c наблюдаемого объекта σ , $A' = A_o$ — измеренное (искаженное) значение азимута, h_c — истинная высота (угол места) наблюдаемого объекта, $A_i = \Omega - 90^\circ$ — азимут нормали наклоненной платформы инструмента (Oz'). Величины $A'z'$ и i^* , необходимые для вычисления поправки азимута за наклон платформы, можно найти из сферических треугольников $A'z'z$ и $zz'p$:

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

$$\sin i^* = \sin i' \frac{\sin(A' - A_i)}{\sin(A'z')} \quad (8)$$

Зная i^* , поправку азимута $\delta A_i^* = A' - A_c$ можно найти аналогично вычислению поправок азимута за наклон горизонтальной оси инструмента i_2 :

$$\delta A_i^* = i^* \operatorname{tg} h_c. \quad (9)$$

1.3. Вычисление нуля-пункта шкалы азимута A_2^0 , коллимации и наклона горизонтальной оси кинотеодолита (КТ-50). Коллимация s и наклон горизонтальной оси i_2 влияют главным образом на точность измере-

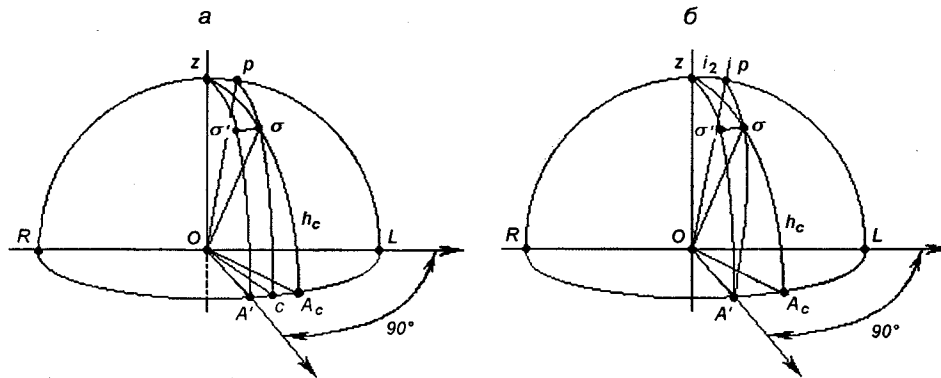


Рис. 3. Влияние коллимации c и наклона горизонтальной оси инструмента i_2 на точность измерения азимута (A_c и A' — истинное и искаженное значения азимута)

ния азимута. В предположении малости величин c и i_2 ошибки отсчетов азимута $\delta A_c = A' - A_c$ и $\delta A_{i_2} = A' - A_c$ (см. рис. 3, а, б) определяются формулами [1, 3, 4]:

$$\begin{aligned} \delta A_c &= \frac{c}{\cosh h_c}, \\ \delta A_{i_2} &= i_2 \cdot \operatorname{tgh} h_c. \end{aligned} \quad (10)$$

Из формул (10) видно, что погрешность отсчетов азимута, вызываемых коллимацией и наклоном горизонтальной оси, зависит от высоты наблюдаемых объектов над горизонтом h_c . Для инструментов, не допускающих перекладку, знаки ошибок азимута δA_c и δA_{i_2} изменяться не будут.

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

$$\Delta A = A_2^0 + \delta A_c + \delta A_{i_2} + \delta A_i^*. \quad (11)$$

После того как наклон платформы i и соответствующие ему поправки δA_i^* определены, нуль-пункт A_2^0 , коллимацию c и наклон горизонтальной оси i_2 можно найти из уравнений вида

$$A_2^0 + \delta A_c + \delta A_{i_2} = \Delta A - \delta A_i^*. \quad (12)$$

Если входящие в (12) поправки представить точными формулами, то уравнения получаются слишком громоздкими. Применение формул (9) и (10) значительно упрощает задачу. Уравнения (12) в таком случае будут иметь вид

$$A_2^0 + \frac{c}{\cosh h_c} + i_2 \cdot \operatorname{tgh} h_c = \Delta A - i^* \cdot \operatorname{tgh} h_c, \quad (13)$$

или

$$c + A_2^0 \cdot \cosh h_c + i_2 \cdot \sinh h_c = \Delta A \cdot \cosh h_c - i^* \cdot \sinh h_c. \quad (14)$$

Решая систему уравнений (14) методом наименьших квадратов, найдем величины c , A_2^0 , i_2 . Далее вычислим поправки азимута с помощью формул (9)—(11). После этого уточненные координаты оптической оси инструмента можно определить как

$$A_a = A_o + \Delta A, \quad h_a = h_o + \Delta h,$$

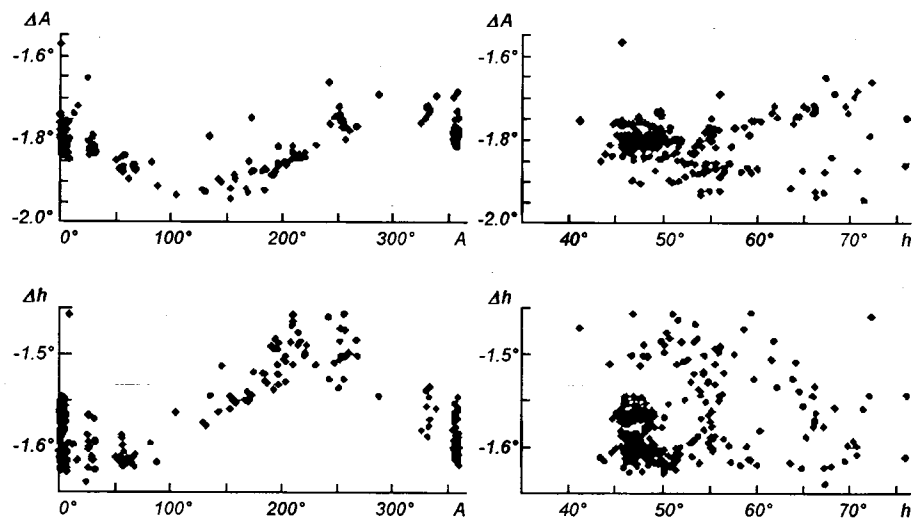


Рис. 4. Невязки позиционных наблюдений 337 звезд, полученных на КТ-50

где A_0 , h_0 — наблюдаемые координаты КО, Δh — общая поправка высоты, равная сумме поправки высоты δh за наклон платформы, вычисленной по формуле (7), и поправок высоты за коллимацию c и суммарный наклон $i_2 + i^*$ горизонтальной оси согласно [4]:

$$\Delta h = \delta h + \frac{c^2 + (i_2 + i^*)^2}{2} \operatorname{tgh} c + \frac{c(i_2 + i^*)}{\operatorname{cosh} c}.$$

1.4. Результаты исследования наблюдательного инструмента КТ-50. С помощью приведенного алгоритма была исследована координатная система кинотеодолита КТ-50, перекладка которого не допускается. При этом были подвергнуты обработке и анализу данные более 300 позиционных наблюдений звезд, полученных на этом инструменте. Невязки $\Delta A_i = A_{oi} - A_{ci}$ и $\Delta h_i = h_{oi} - h_{ci}$ этих наблюдений приведены на рис. 4. Они показывают, что имеют место коллимация, наклоны горизонтальной и вертикальной осей, люфты и сбои.

В результате вычислений были определены значения параметров, характеризующих координатную систему наблюдательного инструмента:

- нуль-пункты шкал азимута и высоты 1-го приближения:

$$A^0 = -1.8058^\circ \pm 0.0025^\circ, \quad H^0 = -1.5745^\circ \pm 0.0022^\circ,$$

- нуль-пункт шкалы азимута: $A_2^0 = -1.8864^\circ \pm 0.0437^\circ$,

- коллимация: $c = 0.0072^\circ \pm 0.0027^\circ$;

- наклон горизонтальной оси: $i_2 = -0.0405^\circ \pm 0.0064^\circ$;

- наклон горизонтальной платформы и положение узла:

$$i' = 0.0568^\circ \pm 0.0074^\circ, \quad \Omega = 163.8433^\circ \pm 0.3962^\circ,$$

- азимут наклона вертикальной оси инструмента: $A_i = 253.8433^\circ \pm 0.3962^\circ$.

Амплитуды люфтов составили 0.0415° для высоты и 0.0725° для азимута.

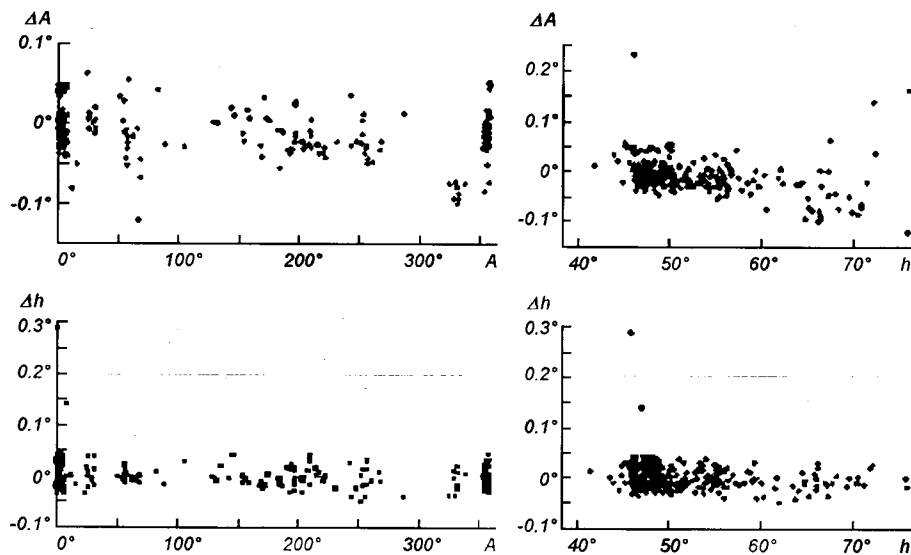


Рис. 5. Невязки позиционных наблюдений тех же звезд после обработки

Найденные величины позволяют вычислять поправки ΔA и Δh с точностью $\pm 0.0017^\circ - 0.0022^\circ$ и $\pm 0.0015^\circ - 0.0017^\circ$ соответственно.

После учета инструментальных поправок невязки ΔA и Δh этих наблюдений имеют вид, показанный на рис. 5. Они содержат ошибки наведения (гидирования) и сбои.

2. 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 гидирования наблюдаемое положение КО практически никогда не совпадает с положением оптического центра.

Положение КО в поле зрения инструмента характеризуется его координатами относительно оптического центра поля, которые могут быть определены при обработке фотографических, телевизионных или ПЗС-наблюдений КО. Рассмотрим разработанную нами процедуру вычисления поправок для учета смещения наблюдаемого КО относительно оптического центра, применяемую для обработки ПЗС-наблюдений при малых угловых размерах поля, что ограничивает попадание звезды в кадр.

Пусть x, y — координаты объекта в пикселах в прямоугольной системе координат, связанной с центром кадра, ось Ox которой направлена по возрастанию азимута, а ось Oy — по возрастанию высоты. Зная угловые размеры кадра по высоте и азимуту (p_h и p_A) и размеры кадра в пикселах (R_h и R_A), определим коэффициенты $M_h = p_h/R_h$ и $M_A = p_A/R_A$ для перехода от пикселов к угловой мере.

Угловые смещения КО в поле кадра будут равны $\delta\xi = x \cdot M_A$ и $\delta\eta = y \cdot M_h$ по оси x и оси y соответственно. Так как для высоты поправка поля всегда равна поправке высоты ($\delta h = \delta\eta$), то высота КО будет равна $h_k = h_a + \delta h = h_a + y \cdot M_h$, где h_a — угол места (высота) оптического центра или центра кадра.

Поправку азимута, зависящую от высоты, найдем из соотношений, получаемых из сферического треугольника, вершинами которого являются точка зенита z , центр поля (кадра) и наблюдаемый КО:

$$\cos r = \cos \delta \eta \cdot \cos \delta \zeta = \sinh_a \cdot \sinh_k + \cosh_a \cdot \cosh_k \cdot \cos \delta A,$$

$$\delta A = \arccos \left(\frac{\cos \delta \eta \cdot \cos \delta \zeta - \sinh_a \cdot \sinh_k}{\cosh_a \cdot \cosh_k} \right).$$

Таким образом, азимут КО будет равен $A_k = A_a + \delta A$, где A_a — азимут оптической оси, совпадающей с центром кадра.

Следует отметить, что данная процедура вычисления поправок по данным ПЗС-наблюдений разработана нами для азимутальных инструментов в предположении, что растровых искажений нет. При наличии растровых искажений необходимо применять коррекцию растра.

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.

1. Блажко С. Н. Курс практической астрономии. — М.: Наука, 1979.—432 с.
2. Пальцев Н. Г. Применение цифровых фильтров для обработки координатной информации, полученной при наблюдениях ИСЗ // Околосемная астрономия 2003: Тр. конф. — СПб, 2003.—Т. 2.—С. 218—223.
3. Подобед В. В. Фундаментальная астрометрия. Определение координат звезд. — М.: Физматгиз, 1962.—340 с.
4. Подобед В. В., Нестеров В. В. Общая астрометрия. — М.: Наука, 1982.—576 с.

Поступила в редакцию 27.08.07