

УДК 629.1:543.42

В.Е. Саваневич¹, А.М. Кожухов², А.Б. Брюховецкий², Е.Н. Диков³¹ Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков² Национальный Центр управления и испытаний космических средств³ Научно-исследовательский, проектно-конструкторский институт микрографии, Харьков

ОЦЕНКА ЭКВАТОРИАЛЬНЫХ КООРДИНАТ АСТЕРОИДА ПО ОЦЕНКАМ ЕГО КООРДИНАТ НА ПЗС-КАДРЕ

Разработан метод оценки экваториальных координат астероида по его координатам в системе координат ПЗС-кадра, учитывающий зависимость ошибок оценки экваториальных координат от видимого блеска опорных звезд, а также реализующий равномерный выбор опорных звезд на изображении для повышения точности оценки. Путем экспериментальных исследований на натуральных данных подтверждена работоспособность метода, определены его точностные характеристики. Метод использован авторами в разработанной системе оперативного автоматизированного обнаружения новых и сопровождения известных астероидов.

Ключевые слова: астероид, оценка экваториальных координат, ПЗС-кадр.

Введение

Постановка проблемы. В связи с проблемами астероидной опасности интерес к астероидам в настоящее время достаточно велик [1]. Создание единой базы измерений астероидов и комет – Центра малых планет (англ. Minor Planet Center, MPC) [2], привело к появлению единого формата представления измерений [3], согласно которого координаты астероида должны быть представлены во второй системе экваториальных координат [4, 5] на эпоху 2000 года (J2000.0). Изучение астероидов, в том числе сближающихся с Землей, в основном проводится с помощью оптических средств наблюдения, оснащенных ПЗС-матрицами [4], при использовании которых для первоначальной оценки доступны только координаты астероидов в системе координат (СК) ПЗС-кадра (прямоугольная СК с центром в левом верхнем углу ПЗС-кадра). Поэтому возникает необходимость в оценке экваториальных координат астероидов по его прямоугольным координатам на ПЗС-кадре. В настоящее время выдвигаются весьма высокие требования к точности измерений экваториальных координат астероидов – ошибка должна быть менее 1 угловой секунды [6]. Поэтому задача разработки методов, позволяющих провести оценку экваториальных координат по прямоугольным с точностью не хуже требуемой, является актуальной.

Анализ литературы. Можно выделить два основных метода оценки экваториальных координат небесных объектов. Первый метод (так называемый абсолютный) позволяет получать экваториальные координаты небесных объектов без использования какой-либо дополнительной информации о положении звезд или состоянии инструмента [4, 7]. Основным недостатком данного метода следует считать то, что высокая точность при его применении достигается только при использовании телескопов специ-

альной конструкции (меридианные телескопы, меридианные круги) [4], которые слабо приспособлены для наблюдений астероидов. На телескопах других конструкций применяется вариант данного метода, в котором за экваториальные координаты центра изображения принимаются показания датчиков поворота телескопа (метод «прямого отсчета» [8]) с последующим пересчетом других прямоугольных координат в экваториальные. Однако в этом случае метод не позволяет добиться требуемой точности даже после проведения коррекции измерений по эталонным звездам [9].

Вторым методом является относительный (дифференциальный) метод [4], в котором экваториальные координаты объекта оцениваются относительно известных экваториальных координат звезд, положение которых на изображении известно. Данные звезды называются опорными. Основным недостатком данного метода считалась необходимость наличия в поле зрения инструмента достаточного количества опорных звезд, что являлось серьезной проблемой для телескопов с малыми полями зрения. Однако, в настоящее время, с публикацией подробных звездных каталогов, охватывающих всю небесную сферу [10], для телескопов, на которых обычно проводят наблюдения астероидов (телескопы с полями зрения шириной от 15 угловых минут до нескольких градусов), данная проблема может считаться решенной. Поэтому для наблюдений астероидов в настоящее время используют практически только относительный метод. Существует несколько разновидностей относительного метода, отличающихся между собой количеством определяемых параметров и необходимым количеством опорных звезд. Наиболее полное описание данных разновидностей представлено в работе [11]. В частности, в ней изложен вариант применения для оценки экваториальных координат обобщенного метода наименьших квадратов (МНК)

(обобщенный метод депедансов), в котором производится учет ошибки оценки координат, в зависимости от положения объекта на изображении. В то же время, в работе не были рассмотрены вопросы выбора опорных звезд в случае наличия на изображении искажений, вызванных особенностями используемой оптической системы, а также учета зависимости точности экваториальных координат от уровня видимого блеска объекта и координат его местоположения. Работы, в которых бы рассматривались данные вопросы, в настоящее время авторам не известны.

Целью статьи является разработка метода оценки экваториальных координат астероида по его координатам в СК ПЗС-кадра с учетом возможного наличия искажений изображения и зависимости точности оценки экваториальных координат астероида от значения его видимого блеска и от местоположения изображения от него на ПЗС-кадре.

Постановка задачи. Изображение астероида формируется в фокальной плоскости телескопа на ПЗС-матрице. Считается, что процесс обнаружения-измерения оптических сигналов на отдельном ПЗС-кадре произведен и для каждого обнаруженного сигнала сформирована отметка с координатами в системе координат ПЗС-кадра (оцененные координаты) и амплитудой [12]. Оценка координат каждого небесного объекта производится независимо, стробы, в которых производится оценка не пересекаются между собой [12].

На кадре имеется достаточное количество изображений опорных звезд, т.е. объектов с известными координатами в системе координат ПЗС-матрицы и яркостью, для которых в опорном звездном каталоге найдены соответствующие им объекты с экваториальными координатами α (прямое восхождение), δ (склонение) и оценкой видимого блеска m . Необходимо на основании экваториальных координат центра изображения и прямоугольных координат сигналов опорных звезд в системе координат ПЗС-матрицы разработать метод оценки экваториальных координат астероида по его прямоугольным координатам на кадре.

Изложение основного материала

Изображение оптической системы. На рис. 1 представлен телескоп, как идеальная оптическая система, буквами КК обозначена идеальная оптическая система, H_1 и H_2 – главные точки объектива идеальной оптической системы, $H'N'$ и $H''N''$ – главные плоскости оптической системы, В – вторая фокальная плоскость, А – реальная плоскость ПЗС-матрицы, T' – оптический центр ПЗС-кадра, F_2 – точка заднего фокуса реального объектива, Р – полюс мира, Т – проекция оптического центра на небесной сфере, имеющая экваториальные координаты α_0, δ_0 .

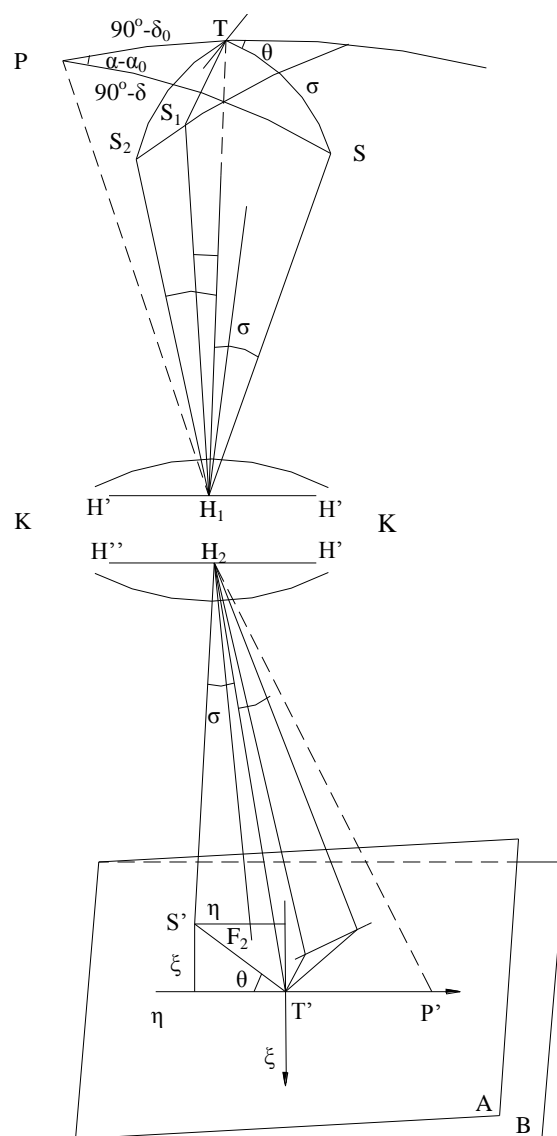


Рис. 1. Построение изображения идеальной оптической системой

В идеальной оптической системе изображение формируется по законам центральной проекции [4, 11]. В этом случае большие круги небесной сферы, проведенные через точку Т, проектируются на плоскость ПЗС-матрицы в виде прямых линий, а малые круги – в виде пучков лучей конусных сечений [4, 11]. Пусть имеется звезда S, с экваториальными координатами α, δ . Если построить в плоскости А прямоугольную систему координат $\xi T' \eta$ так, что ось $T' \eta$ была направлена вдоль проекции круга склонений TP, а ось $T' \xi$ перпендикулярно ей в сторону увеличения прямого восхождения, то из треугольника $H_2 T' S'$ можно получить следующие формулы для прямоугольных координат изображения звезды S' [4]:

$$\begin{aligned} \xi &= p \sin \theta = Ftg \sigma \sin \theta; \\ \eta &= p \cos \theta = Ftg \sigma \cos \theta, \end{aligned} \quad (1)$$

где $p = T'S'$; $F = H_2T'$; θ – позиционный угол; σ – центральный угол проекции звезды S .

Такая система координат на ПЗС-матрице носит название идеальной системы координат (на английском языке – Standard Coordinates) [5, 10].

Из треугольника PTS с помощью формул сферической тригонометрии можно получить формулы для идеальных координат ξ, η через экваториальные координаты звезды α, δ и оптического центра кадра α_0, δ_0 [4, 11]:

$$\begin{cases} \xi = \frac{\cos \delta \sin(\alpha - \alpha_0)}{\sin \delta \sin \delta_0 + \cos \delta \cos \delta_0 \cos(\alpha - \alpha_0)}; \\ \eta = \frac{\sin \delta \cos \delta_0 - \cos \delta \sin \delta_0 \cos(\alpha - \alpha_0)}{\sin \delta \sin \delta_0 + \cos \delta \cos \delta_0 \cos(\alpha - \alpha_0)}. \end{cases} \quad (2)$$

Соответственно, получить экваториальные координаты точки с известными идеальными координатами можно, например, по следующим формулам:

$$\begin{cases} \alpha = \alpha_0 + \arctg\left(\frac{-\xi}{\cos \delta_0 - \eta \sin \delta_0}\right); \\ \delta = \arcsin \frac{\eta \cos \delta_0 + \sin \delta_0}{\sqrt{1 + \xi^2 + \eta^2}}. \end{cases} \quad (3)$$

Система координат на изображении, полученном с помощью телескопа, в общем случае, отличается от идеальной (по крайней мере, масштабом, сдвигом и поворотом), причем для каждой конкретной оптической системы данные отличия имеют свои уникальные особенности. Они могут зависеть от оптико-механического типа оптической системы, быть свойственными всем оптическим системам данного типа, а также индивидуальными, так как не существует абсолютно одинаковых оптических систем. Данные отличия носят название оптических аберраций.

Редукционные уравнения. Так как между плоскими идеальными и сферическими экваториальными координатами имеется однозначная взаимосвязь (зависимости (2), (3)), то задачу оценки экваториальных координат астероида при заданных его координатах в СК ПЗС-кадра можно свести к оценке параметров зависимости между координатами объектов в двух прямоугольных системах координат: идеальной (ξ, η) и СК ПЗС-кадра (x, y).

Для проведения оценки параметров (коэффициентов) данной зависимости сначала из априорных соображений задают ее вид.

Например, в простейшем случае рассматриваемая зависимость сводится к простому преобразованию:

$$\begin{cases} \xi = a_1x + b_1y + c_1; \\ \eta = a_2x + b_2y + c_2. \end{cases} \quad (4)$$

Известными величинами в системе уравнений (4) являются идеальные (в системе идеальных координат ξ и η) и оцененные (в системе координат

ПЗС-матрицы) координаты опорных звезд; требуется найти коэффициенты преобразования (a_k, b_k, c_k).

Данные коэффициенты определяют зависимость координат объектов в идеальной системы координат от их координат в системе координат ПЗС-матрицы, а выражение (4) называют редукционными уравнениями или моделями постоянных пластинок [11], а коэффициенты a_k, b_k, c_k – постоянными пластинами.

Термин «постоянные пластины» появился во время широкого использования в астрофотографии фотографических пластинок, для которых первоначально и разрабатывались методы получения коэффициентов уравнений связи.

На данный момент термин применяется и для коэффициентов уравнений связи, полученных для ПЗС-кадров [4].

Для нахождения постоянных пластинок в выражении (4) достаточно трех звезд (6 уравнений – 6 неизвестных).

Однако, из-за имеющихся шумов, помех, ошибок, неточностей, найденные из этих уравнений постоянные пластины a_k, b_k, c_k оказываются неточными. Поэтому их вычисляют по возможно большему количеству опорных звезд, т.е. для каждой звезды записывают такую пару уравнений, а затем решают полученную избыточную систему методом наименьших квадратов (МНК), где МНК-оценкой коэффициентов модели постоянных пластинок является вектор [13]:

$$\hat{\theta}_{kt} = \arg \min_{\theta_{kt}} \tilde{Y}_{kt} - F_t \theta_{kt}^T W_{kt}^{-1} \tilde{Y}_{kt} - F_t \theta_{kt}, \quad (5)$$

где $\theta_{kt} = (a_{kt}, b_{kt}, c_{kt})$ – вектор коэффициентов преобразования для k -й идеальной координаты для t -го ПЗС-кадра;

$$\tilde{Y}_{1t} = (\xi_{1t}, \xi_{2t}, \dots, \xi_{N_{3Bt}}),$$

$$\tilde{Y}_{2t} = (\eta_{1t}, \eta_{2t}, \dots, \eta_{N_{3Bt}}) -$$

совокупности соответствующих идеальных координат опорных звезд, рассчитанных по формуле (2), для t -го ПЗС-кадра; N_{3B} – количество опорных звезд; W – диагональная (исходя из постановки задачи) матрица весов ошибок.

$$F_t^T = \begin{pmatrix} x_{1t} & \dots & x_{it} & \dots & x_{N_{3Bt}} \\ y_{1t} & \dots & y_{it} & \dots & y_{N_{3Bt}} \\ 1 & \dots & 1 & \dots & 1 \end{pmatrix} - \quad (6)$$

матрица плана [12]; x_{it}, y_{it} – координаты отметки, соответствующей i -й опорной звезде на t -го ПЗС-кадра.

Матрица плана при этом будет общая для обоих уравнений (4). Решением системы уравнений (5)

(МНК-оценкой постоянных пластинок) является вектор [13]:

$$\hat{\theta}_{kt} = (F_t^T W_t^{-1} F_t)^{-1} F_t^T W_t^{-1} \tilde{Y}_{kt}, \quad (7)$$

где $\hat{\theta}_{kt}$ – искомые постоянные пластинок.

Обеспечить высокую точность оценки постоянных пластинок линеаризованной моделью (4) возможно только на небольших полях зрения и при отсутствии серьезных искажений изображения, вызванных оптическими aberrациями или в случае, когда объект, координаты которого необходимо оценить, находится в центре изображения. В других случаях используют модели с учетом членов более высоких порядков, например, квадратичную модель [4, 11]:

$$\begin{aligned} \xi &= a_1x + b_1y + c_1 + d_1xy + e_1x^2 + f_1y^2; \\ \eta &= a_2x + b_2y + c_2 + d_2xy + e_2x^2 + f_2y^2, \end{aligned} \quad (8)$$

или кубическую модель [11]:

$$\begin{aligned} \xi &= a_1x + b_1y + c_1 + d_1xy + e_1x^2 + f_1y^2 + \\ &+ g_1x^3 + h_1y^3 + k_1xy^2 + l_1x^2y; \\ \eta &= a_2x + b_2y + c_2 + d_2xy + e_2x^2 + f_2y^2 + \\ &+ g_2x^3 + h_2y^3 + k_2xy^2 + l_2x^2y, \end{aligned} \quad (9)$$

где $a_k, b_k, c_k, d_k, e_k, f_k, g_k, h_k, k_k, l_k$ – коэффициенты соответствующей модели.

Не трудно показать, что матрица плана для квадратичной модели имеет вид:

$$F_t^T = \begin{pmatrix} x_{1t} & \dots & x_{it} & \dots & x_{N_{3B}t} \\ y_{1t} & \dots & y_{it} & \dots & y_{N_{3B}t} \\ 1 & \dots & 1 & \dots & 1 \\ x_{1t}y_{1t} & \dots & x_{it}y_{it} & \dots & x_{N_{3B}t}y_{N_{3B}t} \\ x_{1t}^2 & \dots & x_{it}^2 & \dots & x_{N_{3B}t}^2 \\ y_{1t}^2 & \dots & y_{it}^2 & \dots & y_{N_{3B}t}^2 \end{pmatrix}. \quad (10)$$

В свою очередь, для кубической модели:

$$F_t^T = \begin{pmatrix} x_{1t} & \dots & x_{it} & \dots & x_{N_{3B}t} \\ y_{1t} & \dots & y_{it} & \dots & y_{N_{3B}t} \\ 1 & \dots & 1 & \dots & 1 \\ x_{1t}y_{1t} & \dots & x_{it}y_{it} & \dots & x_{N_{3B}t}y_{N_{3B}t} \\ x_{1t}^2 & \dots & x_{it}^2 & \dots & x_{N_{3B}t}^2 \\ y_{1t}^2 & \dots & y_{it}^2 & \dots & y_{N_{3B}t}^2 \\ x_{1t}^3 & \dots & x_{it}^3 & \dots & x_{N_{3B}t}^3 \\ y_{1t}^3 & \dots & y_{it}^3 & \dots & y_{N_{3B}t}^3 \\ x_{1t}^2y_{1t} & \dots & x_{it}^2y_{it} & \dots & x_{N_{3B}t}^2y_{N_{3B}t} \\ x_{1t}^2y_{1t} & \dots & x_{it}^2y_{it} & \dots & x_{N_{3B}t}^2y_{N_{3B}t} \end{pmatrix}. \quad (11)$$

Существуют и другие, более сложные модели постоянных пластинок, описанные, например, в [11], однако экспериментальные исследования и опыт практической эксплуатации показали, что значительное усложнение оценки постоянных пластинок не компенсируется серьезным приростом в точности результатов.

Поэтому в дальнейшем использованы модели постоянных пластинок (4), (8), (9).

Формирование матрицы весов ошибок. Элементы диагональной матрицы ошибок W на t -м ПЗС-кадре w_{iit} формируются для каждой опорной звезды, участвующей в МНК-оценке постоянных пластинок, как квадрат среднеквадратического отклонения (СКО) ошибок для данной звезды:

$$w_{iit} = \hat{\sigma}_{it}^2, \quad (12)$$

где $\hat{\sigma}_{it}^2$ – суммарная дисперсия оценки экваториальных координат для i -й опорной звезды на t -м ПЗС-кадре.

Непосредственное определение СКО для единичной звезды невозможно, однако его можно представить в виде значения аппроксимирующего полинома, который представляет СКО, как функцию от координат звезды в СК ПЗС-кадра x, y и ее видимого блеска m , выраженного в звездных величинах.

В качестве такого полинома принимается аддитивная зависимость СКО оценки каждой экваториальной координаты звезды от видимого блеска и обеих прямоугольных координат в системе ПЗС-кадра:

$$\begin{aligned} \hat{\sigma}_{\alpha it}(m, x, y) &= a_1m_{it}^2 + a_2m_{it} + a_3 + \\ &+ a_4x_{it}^2 + a_5x_{it} + a_6y_{it}^2 + a_7y_{it}; \\ \hat{\sigma}_{\delta it}(m, x, y) &= b_1m_{it}^2 + b_2m_{it} + b_3 + \\ &+ b_4x_{it}^2 + b_5x_{it} + b_6y_{it}^2 + b_7y_{it}, \end{aligned} \quad (13)$$

где $\hat{\sigma}_{\alpha it}(m, x, y)$, $\hat{\sigma}_{\delta it}(m, x, y)$ – оценки СКО оценки соответствующих экваториальных координат i -й опорной звезды на t -м ПЗС-кадре;

(a_1, \dots, a_7) и (b_1, \dots, b_7) – коэффициенты полиномиальных зависимостей СКО оценки экваториальных координат объекта для каждой экваториальной координаты от координат в системе координат ПЗС-матрицы и оценки видимого блеска объекта;

m_{it} – каталожная оценка видимого блеска для i -й опорной звезды на t -м ПЗС-кадре.

Коэффициенты полиномиальных зависимостей СКО оценки экваториальных координат от координат объекта в СК ПЗС-кадра и оценки видимого блеска объекта для каждой координаты определяются МНК-оценкой (7).

Матрица плана для получения данной оценки имеет вид:

$$F_t^T = \begin{pmatrix} m_{1t}^2 & \dots & m_{it}^2 & \dots & m_{N_{3B}t}^2 \\ m_{1t} & \dots & m_{it} & \dots & m_{N_{3B}t} \\ 1 & \dots & 1 & \dots & 1 \\ x_{1t}^2 & \dots & x_{it}^2 & \dots & x_{N_{3B}t}^2 \\ x_{1t} & \dots & x_{it} & \dots & x_{N_{3B}t} \\ y_{1t}^2 & \dots & y_{it}^2 & \dots & y_{N_{3B}t}^2 \\ y_{1t} & \dots & y_{it} & \dots & y_{N_{3B}t} \end{pmatrix},$$

а совокупности идеальных координат $\tilde{Y}_{1t}, \tilde{Y}_{2t}$ в (7) заменяются совокупностями модулей невязок оценок соответствующих координат с их каталожными значениями:

$$\tilde{Y}_{\alpha t} = (|\Delta_{\alpha 1t}|, |\Delta_{\alpha 2t}|, \dots, |\Delta_{\alpha N_{3B}t}|);$$

$$\tilde{Y}_{\delta t} = (|\Delta_{\delta 1t}|, |\Delta_{\delta 2t}|, \dots, |\Delta_{\delta N_{3B}t}|),$$

где $|\Delta_{\alpha it}| = \hat{\alpha}_{it} - \alpha_{it}$; $|\Delta_{\delta it}| = \hat{\delta}_{it} - \delta_{it}$; $\hat{\alpha}_{it}, \hat{\delta}_{it}$ – оценки экваториальных координат i -й опорной звезды на t -м ПЗС-кадре; α_{it}, δ_{it} – каталожные значения экваториальных координат i -й опорной звезды на t -м ПЗС-кадре.

Суммарная дисперсия оценки экваториальных координат для i -й опорной звезды на t -м ПЗС-кадре определяется следующим образом:

$$\hat{\sigma}_{it}^2 = \hat{\sigma}_{\alpha it}^2(m, x, y) + \hat{\sigma}_{\delta it}^2(m, x, y). \quad (14)$$

Особенности первичного отождествления.

Изначально параметры (масштаб, сдвиг и поворот) расположения ПЗС-кадра относительно небесной сферы известны с очень низкой точностью. Это приводит к невозможности проведения качественного отождествления большого количества отметок, сформированных на кадре, со звездным каталогом на этапе первичного отождествления. Поэтому первичное отождествление проводится для небольшого количества (50–100) наиболее ярких отметок. Меньшая по объему выборка может привести к ошибочному отождествлению, особенно на телескопах с широкими (более 2°) полями зрения, а большая приводит к значительному увеличению вычислительных затрат без существенного выигрыша в качестве первичного отождествления. Для проведения отождествления отбираются звезды на данном участке небесной сферы, видимый блеск которых превышает заранее заданную величину. После проведения отождествления определяются первоначальные значения сдвига звездного узора на кадре относительно этого же узора в каталоге. При этом значения масштаба изображения и его поворот относительно звездного узора на небесной сфере считаются известными с приемлемой точностью из значений фокусного расстояния телескопа и угла поворота установки ПЗС-камеры.

Выбор отметок для проведения МНК-оценки.

Для оценки экваториальных координат астероида, который может соответствовать любой точке ПЗС-кадра, используются модели постоянных пластинки в виде полиномов второй или третьей степени (формулы (8), (9)). В этом случае, согласно [11], необходимо равномерное распределение используемых отметок для обеспечения предельно допустимой точности оценки коэффициентов постоянных пластинки. Однако звезды на небесной сфере распределены неравномерно. Соответствующие им отметки в кадре также не могут иметь равномерное распределение. Кроме того, из-за искажений, вносимых оптической системой, количество отметок, отождествленных с каталожными звездами, на краях кадра будет намного меньше, чем в центре кадра. В связи с этим действительно равномерное распределение измерений для оценки коэффициентов постоянных пластинки обеспечить невозможно. Поэтому задача равномерного распределения отметок по всему изображению заменяется задачей равномерного распределения отметок в заданном количестве предварительно введенных диапазонов, на которые равномерно делится все изображение. В каждом диапазоне берется одинаковое количество отметок с наибольшей амплитудой в данном диапазоне. Одновременно из каталога выбирается количество звезд с наибольшим блеском несколько большее, чем количество выбранных отметок. После этого производится взаимное отождествление выбранных звезд и отметок.

Вычислительные особенности МНК-оценки коэффициентов постоянных пластинки, расчета экваториальных координат астероидов и центра ПЗС-кадра. Для улучшения качества оценки экваториальных координат на краях кадра МНК-оценка проводится последовательно несколько раз с использованием постоянных пластинки, полученных на предыдущей итерации. При этом на каждой последующей итерации количество звезд и отождествляемых с ними отметок увеличивается. Количество звезд, отбираемых для отождествления на каждой итерации, несколько больше, чем количество отобранных отметок.

Все МНК-оценки коэффициентов постоянных пластинки проводятся по формуле (7). При этом используются модели постоянных пластинки (4), (8) или (9), которым соответствуют матрицы плана (6), (10), (11).

Расчет экваториальных координат астероида по полученным коэффициентам постоянных пластинки происходит в два этапа. На первом этапе по полученным коэффициентам постоянных пластинки и оцененным координатам получают идеальные координаты астероида (формулы (4), (8) или (9) в зависимости от выбранной модели постоянных пластинки). На втором этапе из идеальных координат по формуле (3) получают экваториальные координаты астероида.

Экваториальные координаты центра ПЗС-кадра принимают непосредственное участие в оценке экваториальных координат. Сначала они используются при получении идеальных координат каталожных звезд из их экваториальных координат (2), потом – при получении оценок экваториальных координат астероида из его идеальных координат, полученных по постоянным пластинки (3). Из-за ошибок наведения и суточного ведения, реальные экваториальные координаты центра ПЗС-кадра отличаются от заданных. Поэтому перед проведением оценки коэффициентов постоянных пластинки необходимо провести уточнение экваториальных координат центра ПЗС-кадра.

Вычислительный метод оценки экваториальных координат астероида. С учетом описанных выше особенностей, вычислительный метод оценки экваториальных координат астероида является следующей последовательностью операций.

1. Первичное отождествление звездного узора на ПЗС-кадре с каталогом. В отождествлении участвует N_{0mt} отметок с максимальной амплитудой и звезды каталога с видимым блеском, превышающим наперед заданную величину $m_{от}$.

2. Оценка экваториальных координат объектов, обнаруженных на изображении проводится в три итерации. После третьей итерации коэффициенты постоянных пластинки для данного ПЗС-кадра считаются определенными. На каждой итерации совершается следующая последовательность действий:

2.1. Выбор отметок для МНК-оценки коэффициентов постоянных пластинки. Изображение делится на $N_{астр}$ диапазонов. Общее количество выбранных отметок на изображении составляет $N_{имт}$, а количество выбранных из каталога звезд – $N'_{имт}$. На первой итерации отождествление производится по значениям сдвига, определенным в п. 1. В дальнейшем, каталожные звезды, отождествленные с выбранными отметками, используются в качестве опорных.

2.2. МНК-оценка коэффициентов постоянных пластинки в соответствии с выражением (7).

2.2.1. Уточнение экваториальных координат центра ПЗС-кадра. Проводится МНК-оценка коэффициентов постоянных пластинки по набору взаимосоответствующих пар «отметка – отождествленная с ней звезда». После этого, по полученным коэффициентам постоянных пластинки и координатам центра ПЗС-кадра в координатах ПЗС-матрицы рассчитываются уточненные экваториальные координаты центра ПЗС-кадра.

При расчетах в качестве экваториальных координат центра ПЗС-кадра используются экваториальные координаты центра ПЗС-кадра, полученные на предыдущей итерации. На первой итерации для данного расчета используются заданные экватори-

альные координаты центра ПЗС-кадра, считанные из заголовка обрабатываемого изображения.

2.2.2. Многопроходовая МНК-оценка коэффициентов постоянных пластинки с использованием уточненных экваториальных координат центра ПЗС-кадра по формуле (7).

2.2.3. МНК-оценка параметров аппроксимирующего полинома (13) зависимости СКО ошибок оценок экваториальных координат астероида от оцененных координат и видимого блеска астероида.

2.2.4. Формирование диагональных элементов матрицы весов обобщенного МНК согласно (14), (12).

2.2.5. Проведение многопроходовой обобщенной МНК-оценки коэффициентов постоянных пластинки с учетом матрицы весов ошибок измерений в соответствии с выражением (7).

3. Определение оценок экваториальных координат всех отметок ПЗС-кадра по полученным коэффициентам постоянных пластинки в соответствии с выражениями (4), (8) или (9), в зависимости от выбранной модели постоянных пластинки, с последующим использованием выражения (3).

Результаты проведения эксперимента. Эксперимент проводился на телескопе Андрушевской астрономической обсерватории с диаметром зеркала 600 мм, оснащенный ПЗС-камерой FLI PL09000 (размер ПЗС-матрицы – 3056×3056 пикселей, размер пикселя – 12 мкм). Наблюдения велись с экспозицией 30с и бинированием.

Для обработки полученных ПЗС-кадров использовалась программа CLT, созданная авторами для обнаружения астероидов и других небесных объектов с ненулевым видимым движением и слабым блеском, использующая данный метод на этапе первичной (внутрикадровой) обработки.

На достаточно больших объемах наблюдений были получены следующие результаты относительно точности оценки экваториальных координат и количества звезд, отождествленных с отметками на ПЗС-кадрах, в зависимости от используемой модели постоянных пластинки (табл. 1). В отождествленные звезды включены не только звезды, использовавшиеся в качестве опорных, но и все каталожные звезды, отождествленные с отметками на ПЗС-кадрах, при использовании полученных коэффициентов постоянных пластинки. Для получения СКО в качестве опорного звездного каталога использовался каталог USNO B1.0. [10]).

Таблица 1

Зависимость СКО оценки экваториальных координат и количества отождествленных звезд от модели постоянных пластинки

Вид модели	Линейная	Квадр.	Куб.
СКО (угловые секунды)	1,6	1,57	0,69
Кол-во звезд	5936	5971	6410

На рис. 2, 3 представлена зависимость точности оценки экваториальных координат звезд от их видимого блеска и местоположения соответствующих им отметок на ПЗС-кадре. Очевидно, что наилучшими точностными характеристиками для всего ПЗС-кадра обладает кубическая модель постоянных пластины (кривая 1), в то время как квадратичная (кривая 2) и линейная (кривая 3) модели могут использоваться только для астероидов, находящихся в центре ПЗС-кадра.

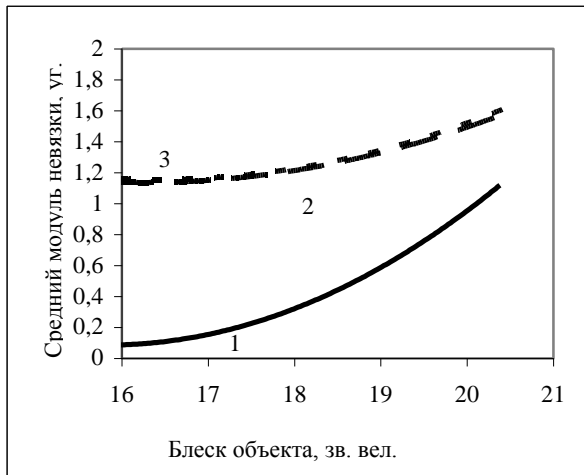


Рис. 2. Зависимость точности оценки экваториальных координат звезд от их видимого блеска



Рис. 3. Зависимость точности оценки экваториальных координат звезд от местоположения соответствующих им отметок на ПЗС-кадре

Для кубической модели постоянных пластины были также экспериментально определены следующие значения констант предложенного метода: количество диапазонов, на которые разбивается кадр для выбора опорных звезд $N_{\text{астр}}=16$; количество отметок, используемых для первичного отождествления $N_{\text{omt}}=50$; предельная звездная величина звезд, отбираемых из каталога для проведения первичного отождествления $m_{\text{от}}=13^m$; количество от-

меток с максимальной яркостью, отобранных на первой, второй и третьей итерациях составляло 400, 700, 1000 соответственно; количество звезд, отобранных для отождествления с отобранными отметками, на первой, второй и третьей составляло 600, 900, 1200 соответственно.

Приведенные результаты получены при практически равномерном распределении опорных звезд по ПЗС-кадру.

В качестве внешней оценки точности оценки экваториальных координат могут выступать невязки между измеренными координатами и расчетным местоположением астероидов, орбиты которых хорошо известны. Такие данные находятся на сайте Центра малых планет [15]. Согласно им, точность оценки экваториальных координат астероидов Андрушевской астрономической обсерваторией (МРС-код А50) за время использования программы, реализующей описанный вычислительный метод, составила $0,23/\pm 0,62$ угловой секунды по прямому восхождению и $0,14/\pm 0,51$ угловой секунды по склонению. Первое число обозначает среднее значение ошибки оценки экваториальной координаты, второе – СКО ошибки. Полученные характеристики ошибок не только соответствует требованиям МРС, но и не уступают таким известным обсерваториям, наблюдающим астероиды, как американская LINEAR (МРС-код 704) средняя точность которого за тот же период в среднем составила $0,31/\pm 0,65$ и $0,45/\pm 0,63$ угловой секунды по прямому восхождению и склонению соответственно.

Выводы

В статье разработан метод оценки экваториальных координат астероида по оценкам его координат в СК ПЗС-кадра. Метод основан на последовательном нахождении идеальных координат астероида путем обобщенной МНК-оценки коэффициентов постоянных пластины с последующим однозначным пересчетом идеальных координат в экваториальные. При этом впервые формирование матрицы весов ошибок измерений обобщенного МНК проводилось с учетом зависимости значения ошибок оценки экваториальных координат от значения видимого блеска объектов. Новизной метода также является организация равномерного выбора опорных звезд и проведение МНК-оценки в несколько итераций, что способствует повышению точности оценки коэффициентов постоянных пластины в особенности при использовании моделей постоянных пластины со степенью выше первой. Путем экспериментальных исследований на натуральных данных подтверждена работоспособность метода, определены его предварительные точностные характеристики при сравнении каталожных и оцененных экваториальных координат каталожных звезд, отождествленных с отметками на ПЗС-кадре, а также полу-

чена внешняя оценка точности оценки экваториальных координат астероидов по данным Центра малых планет. Практическая значимость метода заключается в возможности его использования в системах оперативного автоматизированного обнаружения новых и сопровождения известных астероидов, а также в других системах, где существует необходимость проведения оценки экваториальных координат по звездному узору, например, в системах поиска новых и сверхновых звезд. Подтверждением практической значимости метода является первое в СНГ открытие астероидов с помощью программы автоматического поиска астероидов и других небесных объектов с ненулевым видимым движением.

С мая 2010 года с использованием данной программы Андрушевской астрономической обсерваторией было открыто 9 астероидов с временными наименованиями: 2010 JE3; 2010 JX87; 2010 JF124; 2010 NJ3, 2010 PQ65; 2010 PR65; 2010 RS131; 2010 RL140; 2010 RN140 [15].

Дальнейшие исследования целесообразно сконцентрировать на разработке методов оценки экваториальных координат на изображениях с большими геометрическими искажениями и малым количеством опорных звезд.

Список литературы

1. Ericson J. Asteroids, comets, and meteorites. Cosmic Invaders of the Earth / J. Ericson. – New York: Fact on File, 2003.
2. IAU Minor Planet Center. [Электронный ресурс]. – Режим доступа к ресурсу: <http://www.minorplanetcenter.org/iau/mpc.html>.
3. IAU Minor Planet Center. Format For Optical Astrometric Observations Of Comets, Minor Planets and Natural Satellites. [Электронный ресурс]. – Режим доступа к ресурсу: <http://www.minorplanetcenter.org/iau/info/OpticalObs.html>.
4. Дума Д.П. Загальна астрометрія: навчальний посібник / Д.П. Дума. – К.: Наукова думка, 2007. – 600 с.
5. Абалакин В.К. Основы эфемеридной астрономии / В.К. Абалакин. – М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1979. – 448 с.
6. IAU Minor Planet Center. Guide to Minor Body Astrometry. [Электронный ресурс]. – Режим доступа к ресурсу: <http://www.cfa.harvard.edu/iau/info/Astrometry.html>.
7. Астрономічний енциклопедичний словник / За загальною редакцією Ш.А. Климшина та А.О. Корсунь. – Львів, 2003. – 548 с.
8. Некоторые современные проблемы создания астрономических телевизионно-измерительных систем для наблюдения за искусственными спутниками Земли / В.В. Прокофьева-Михайловская, Н.З. Стрыгин, П.П. Сухов, Г.Ф. Карпенко // Изв. Крымской Астрофиз. Обс. 103. – 2007. – №3. – С. 238-245.
9. Оценка точности телескопа АЗТ-28 при измерении звезд как эталонных объектов / А.М. Кожухов, А.Б. Брюховецкий, В.В. Рыхальский, С.В. Рыценко, Л.М. Матвеев, В.А. Ямницкий // Зб. наук. пр. Об'єднаного НДІ Збройних Сил. – Х.: ОНДІ ЗС, 2007. – Вип. 2 (7). – С. 245-254.
10. Catalog Information and Recommendations, U.S. Naval Observatory / N. Zacharias, R. Gaume, B. Dorland, S.E. Urban. [Электронный ресурс]. – Режим доступа к ресурсу: http://ad.usno.navy.mil/star/star_cats_rec.shtml.
11. Киселев А.А. Теоретические основания фотографической астрометрии / А.А. Киселев. – М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1989. – 264 с.
12. Оценка координат астероида на дискретном изображении / В.Е. Саваневич, А.Б. Брюховецкий, А.М. Кожухов, Е.Н. Диков // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – 2010. – Вып. 162. – С. 134-141.
13. Ермаков С.М. Математическая теория оптимального эксперимента / С.М. Ермаков, А.А. Жиглявский. – М.: Наука, 1987. – 320 с.
14. IAU Minor Planet Center. Numbered-residuals statistics for observatory codes. [Электронный ресурс]. – Режим доступа к ресурсу: <http://www.minorplanetcenter.org/iau/special/residuals2.txt>.
15. MPC 70135 – 70574; MPC 71009 – 71492; MPC 71493–71888; MPC 71889 – 72344. [Электронный ресурс]. – Режим доступа к ресурсу: http://www.minorplanetcenter.org/iau/ECS/MPCArchive/MPCArchive_TBL.html.

Поступила в редколлегию 2.09.2010

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.П. Деденок, ГП НИПИ "Союз", НКА Украины, Харьков.

ОЦІНКА ЕКВАТОРІАЛЬНИХ КООРДИНАТ АСТЕРОЇДА ПО ОЦІНКАМ ЙОГО КООРДИНАТ НА ПЗЗ-КАДРІ

В.С. Саваневич, О.М. Кожухов, О.Б. Брюховецкий, С.Н. Диков

Розроблений метод оцінки екваторіальних координат астероїда по його координатам в системі координат ПЗЗ-кадра, який враховує залежність похибок оцінки екваторіальних координат від видимого блиску опорних зірок, а також реалізує рівномірний вибір опорних зірок на зображенні для підвищення точності оцінки. Шляхом експериментальних досліджень на натурних даних підтверджена працездатність метода, визначені його точнісні характеристики. Метод використано авторами в розробленій системі оперативного автоматизованого виявлення нових та супроводу відомих астероїдів.

Ключові слова: астероїд, оцінка екваторіальних координат, ПЗЗ-кадр.

ESTIMATION OF EQUATORIAL COORDINATES OF ASTEROID ON ACCOUNT OF ESTIMATE OF HIS COORDINATES ON CCD-FRAME

V.E. Savanevich, A.B. Bryukhovetskiy, A.M. Kozhukhov, E.N. Dikov

The method of estimation of equatorial coordinates of asteroid on account of his known coordinates in CCD-frame coordinate system is developed, which takes into account dependence of estimation errors of equatorial coordinates on visible brightness of guide stars, and also realizes uniform choice of guide stars on image for increasing accuracy of estimation. By experimental researches on the natural data availability of a method is confirmed precision of the method is defined. The method has used by authors in developed system of automatic online new asteroids detection and known asteroids tracking.

Keywords: asteroid, equatorial coordinates, CCD-frame.