

УДК 004.932

В.Е. Саваневич¹, Я.С. Мовсесян², Н.Ю. Дихтяр²¹ Ужгородский национальный университет, Ужгород² Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ МЕТОД ВЫБОРА ОПОРНЫХ ЗВЕЗД НА ЦИФРОВЫХ КАДРАХ

В статье разработан вычислительный метод выбора опорных звезд на цифровых кадрах, который учитывает основные особенности процесса формирования астрономических измерений по данным цифровых кадров. Вычислительный метод апробирован в программном обеспечении автоматического поиска астероидов и комет на серии ПЗС-кадров CoLiTec. Разработанный метод выбора опорных звезд обеспечивает высокие показатели точности позиционных измерений астероидов и опорных звезд на цифровом кадре.

Ключевые слова: позиционное измерение, постоянные пластинки, опорные звезды, цифровой кадр.

Введение

Тематика астероидно-кометных астрометрических наблюдений продолжает оставаться актуальной [1 – 3], а их точность продолжает расти. Для этого определение координат небесных объектов производится относительным методом [4 – 7] с использованием опорных звезд. А метод выбора опорных звезд наравне с методами определения положения объектов на цифровых кадрах определяет точность указанных астрометрических наблюдений звезд.

Анализ литературы. В настоящее время разработаны программные комплексы автоматической обработки кадров астероидных обзоров, например CoLiTec [8, 9]. При этом методы определения положения объектов на цифровых кадрах описаны достаточно подробно [9, 10]. Так же имеет место значительное количество статей, посвященных отождествлению кадров [11 – 14]. В свою очередь методы отбора опорных звезд на цифровых кадрах в специальной литературе отображены достаточно скудно.

Постановка задачи. Методами внутрикадровой обработки произведено формирование астрономических измерений. Множество измерений n_{fr} -го кадра обозначается Ω_{nfr} и состоит из $\Omega_{nfr} = \{Y_{1nfr}, \dots, Y_{infr}, \dots, Y_{Qnfr}\}$ измерений. Каждое такое измерение $Y_{infr} = \{x_{in}, y_{in}, A_{in}\} = \{Y_{Kin}, A_{in}\}$ содержит оценки положения $Y_{Kin} = \{x_{in}, y_{in}\}$ и блеска A_{in} небесных объектов. Множество измерений серии кадров Ω_{set} состоит из множеств измерений кадров Ω_{nfr} рассматриваемой серии $\Omega_{set} = \{\Omega_{1fr}, \dots, \Omega_{nfr}, \dots, \Omega_{Nfr}\}$.

На каждом кадре присутствуют измерения, как от неподвижных объектов, так и от ложных и подвижных объектов (объектов с ненулевым видимым движением). На одном кадре от одного небесного

объекта не может быть более одного измерения. Ошибки координат i -го измерения положения и блеска небесного объекта на n_{fr} -м кадре можно считать независимыми как от измерения к измерению, так и от параметра к параметру в одном измерении. Координаты измерений ложных и подвижных объектов распределены равномерно и взаимно независимы.

Методы предварительного [15] или аварийного [16] отождествления позволяют получить линейные постоянные пластинки $(a_{p11}, b_{p11}, c_{p11})$ и $(a_{p12}, b_{p12}, c_{p12})$, определяющие связь между тангенциальной (идеальной) системой координат и системой координат цифрового кадра [16 – 18]:

$$\begin{cases} \xi = a_{p11} \cdot x + b_{p11} \cdot y + c_{p11}; \\ \eta = a_{p12} \cdot x + b_{p12} \cdot y + c_{p12}, \end{cases} \quad (1)$$

где ξ и η – идеальные (тангенциальные) координаты опорных звезд; x, y – измеренные координаты опорных звезд в системе координат цифрового кадра.

Наличие линейных постоянных пластинок позволяет получить оценки экваториальных координат объектов кадра, в соответствии с выражением [5, 6]:

$$\begin{cases} \alpha = \alpha_{00} + \arctg(-\xi / (\cos \delta_{00} - \eta \sin \delta_{00})); \\ \delta = \arcsin\left((\eta \cos \delta_{00} + \sin \delta_{00}) / \sqrt{1 + \xi^2 + \eta^2}\right). \end{cases} \quad (2)$$

где α_{00}, δ_{00} – экваториальные координаты оптического центра ПЗС-матрицы.

Линейных постоянных пластинок не достаточно для отождествления формуляров каталога и измерений кадра при больших размерах поля зрения. С их использованием, как правило, отождествляются только звезды, соответствующие изображениям в центральной части кадра. Чаще всего [7] при итоговом пересчете координат СК цифрового кадра, в экваториальные координаты используется кубическая модель постоянных пластинок [5 – 7], обеспечивающая надежное отождествление и измерение

положение на всем кадре. В свою очередь для надежного получения кубических постоянных пластинок необходимо больше пар формуляр каталога – измерение кадра. Однако необходимое для этого количество пар нельзя отождествить с использованием линейных постоянных пластинок.

Таким образом имеет место противоречие между необходимостью использовать кубической (не менее) модели постоянных пластинок и малым количеством отождествленных пар «измерение – формуляр» на предварительных этапах аварийного или предварительного отождествления измерений кадра и формуляров каталога.

Целью данной статьи является преодоление указанного выше противоречия за счет разработки многоэтапного вычислительного метода выбора опорных звезд на цифровых кадрах, учитывающего основные особенности процесса формирования астрономических измерений по данным этих кадров.

Основной материал

Суть метода отбора опорных звезд на цифровых кадрах. Выходом из сложившегося противоречия является многоэтапное усложнение параметров постоянных пластинок (увеличение порядка постоянных пластинок [7] с уточнением их параметров) с одновременным увеличением количества используемых для их расчета пар.

Отождествление на каждом этапе производится в СК цифрового кадра. Для этого с использованием постоянных пластинок экваториальные координаты звезд пересчитываются в данную СК. При этом вес гипотез о параметрах отождествления кадра и каталога (веса гипотез являются отклонения между положениями объектов в измерениях кадров и формулярах каталога) считается в экваториальных координатах. Связано это с тем, что обратный пересчет экваториальных координат в координаты СК цифрового кадра обладает большими ошибками. Для пересчета измерений в экваториальные координаты используются линейные, а в последующем – кубические постоянные пластины.

В действующей версии метода отбора опорных звезд используется три этапа. На первом отбирается N_{mia} измерений кадра и N_{st} звезд каталога. На каждом следующем шаге количество измерений увеличивается на ΔN_{mia} измерений и ΔN_{st} звезд.

Для отбора звезд каталога на этапах метода выбора опорных звезд их множество упорядочивается по блеску. Множество измерений кадра упорядочивается по значению яркости изображения объектов.

Равномерное распределение кандидатов в опорные звезды на цифровом кадре. Для обеспечения практически равной точности измерений координат объектов на всем кадре целесообразно опорные звезды распределить равномерно на кадре. Равномерное

распределение отождествленных пар на всем кадре обеспечит практически равную точность определения экваториальных координат объектов на всем кадре. Очевидно, что концентрация опорных звезд в каком-то участке кадра (например, в центре) повышает точность измерений этого участка кадра за счет ее снижения в других областях кадра (рис. 1).

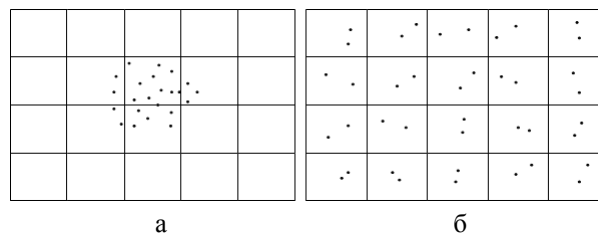


Рис. 1. а – положение самых ярких измерений на кадре, б – равномерное распределение опорных звезд на кадре

Иными словами, количество опорных звезд в той или иной области кадра можно считать ее весом, значимостью в сумме квадратов отклонений, используемых при расчете постоянных пластинок. Кроме того, равномерное распределение отождествленных пар на кадре помогает избежать случаев, соответствующих наличию в одной области кадра большого количества «ярких» измерений/звезд. Примером такого случая является пролет яркого ИСЗ (рис. 2).

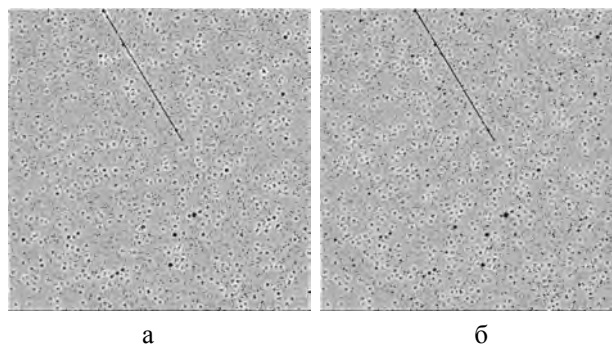


Рис. 2. Отображение на цифровом кадре самых ярких: а – звезд; б – опорных звезд

Если указанные случаи не исключаются из рассмотрения, то достаточно часто возникают сбои при идентификации/поиске известных объектов и отождествление целых кадров становится ненадежным.

В предлагаемом в работе методе для равномерного распределения отождествленных пар на кадре, при выборе звезд для формирования постоянных пластинок (при выборе кандидатов в опорные звезды) проводится фрагментация кадра. В каждом фрагменте кадра, в качестве кандидатов в опорные звезды, отбирается одинаковое количество звезд. Иными словами, кадр делится на $M_{reg} \times M_{reg}$ (M_{reg}^2) частей. Заданное количество измерений кадра N_{mia} и звезд (формуляров каталога) N_{st} делится на количество фрагментов кадра, и в каждом таком

фрагменте отбираются N_{mia}/M_{reg}^2 , N_{st}/M_{reg}^2 самых ярких измерений/звезд кадра/каталога.

В свою очередь, на втором и третьем этапе метода в каждом фрагменте кадра дополнительно отбираются очередные $\Delta N_{mia}/M_{reg}^2$ и $\Delta N_{st}/M_{reg}^2$ самых ярких измерений кадра и формуляров каталога соответственно.

К сожалению, при действующей реализации предлагаемого метода отбора опорных звезд, равномерно отбираются только кандидаты в опорные звезды. При отборе опорных звезд из множества кандидатов, контроль равномерности не производится (табл. 1).

Таблица 1
Пример распределения опорных звезд на кадре (Mreg = 9))

| | | | | | | | | |
|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 9 | 9 | 8 | 13 | 6 | 10 | 10 | 8 | 8 |
| 7 | 7 | 9 | 11 | 9 | 8 | 8 | 17 | 9 |
| 7 | 12 | 8 | 12 | 11 | 8 | 10 | 7 | 9 |
| 10 | 10 | 7 | 10 | 11 | 10 | 11 | 11 | 8 |
| 11 | 8 | 6 | 6 | 5 | 9 | 9 | 6 | 5 |
| 10 | 8 | 7 | 11 | 11 | 13 | 3 | 11 | 12 |
| 7 | 11 | 17 | 9 | 10 | 12 | 10 | 14 | 13 |
| 7 | 10 | 7 | 9 | 10 | 10 | 10 | 10 | 11 |
| 13 | 6 | 13 | 13 | 12 | 9 | 5 | 9 | 10 |
| 0 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Отбраковка кандидатов в опорные звезды.

На каждом этапе метода отбора опорных звезд из множества кандидатов исключаются измерения близких объектов (расстояние между которыми не превышает наперед заданную величину r_{mea_group}). Иными словами i-е и m-е измерения кадра исключаются из кандидатов в опорные звезды, если выполняется условие:

$$\sqrt{(x_{meainfr} - x_{meamnfr})^2 + (y_{meainfr} - y_{meamnfr})^2} \leq r_{mea_group} \quad (3)$$

где $x_{meamnfr}$, $y_{meamnfr}$ – координаты объектов, содержащиеся в измерениях близких объектов в СК ПЗС-кадра

Также пара исключается из рассмотрения, если ей соответствует объект каталога с находящимся в его окрестности еще одним объектом каталога с соизмеримым или большим блеском. Иными словами, бракуются звезды используемого каталога при их принадлежности сгусткам/ кластерам/ компактным группам звезд, согласно данным используемого каталога. Критерием такой принадлежности является наличие рядом с отобранной звездой любой другой звезды на расстоянии меньше чем наперед заданное значение r_{star_group} :

$$\sqrt{(\alpha_{catj} - \alpha_{catl})^2 + (\delta_{catj} - \delta_{meainfr(k)})^2} \leq r_{star_group} \quad (4)$$

Также исключаются измерения объектов, изображения которых не имеют пиков. Критерием отсутствия пика является приблизительное равенство яркости пика и яркости пикселей A_{ik} из области Ω_{peak} размера $C_{peak} \times C_{peak}$ пикселей с центром в пике. Приблизительным равенством считается отличие яркости пикселей области от яркости пика не более чем на N_{Apeak} единицы яркости:

$$(A_{peak} - A_{ik}) \leq N_{Apeak} \text{ для } \forall i, k \in \Omega_{peak} \quad (5)$$

Затем производится решение задачи отождествления [11] с разбиением данной задачи на частные [17], предварительной селекцией гипотез об отождествлении измерений кадра и формуляров каталога, использованием венгерского метода для внутригруппового отождествления [11]. Для улучшения показателей точности [18, 19] оценок постоянных пластинок, после решения задачи отождествления производится отбраковка значительного количества отождествленных пар. Решающей статистикой для отбраковки пар служит суммарное отклонение $\Delta_{\alpha\deltaijk}$ между оценками экваториальных координат в отождествленной паре «измерение-формуляр»:

$$\Delta_{\alpha\deltaijk} = \sqrt{(\alpha_{catj(k)} - \alpha_{meainfr(k)})^2 + (\delta_{catj(k)} - \delta_{meainfr(k)})^2} \quad (6)$$

Пара отбраковывается, если значение $\Delta_{\alpha\betaijk}$ превышает критическое значение:

$$\Delta_{\alpha\deltaijk} > K_{rej} \bar{\Delta}_{\alpha\delta} \quad (7)$$

$$\text{где } \bar{\Delta}_{\alpha\delta} = \sqrt{\frac{1}{N_{cou}} \sum_{k=1}^{N_{cou}} \left((\alpha_{catj(k)} - \alpha_{meainfr(k)})^2 + (\delta_{catj(k)} - \delta_{meainfr(k)})^2 \right)} \quad (8)$$

средний, на множестве выбранных отождествленных пар, модуль отклонения отождествленной пары в экваториальных координатах; N_{cou} – количество отождествленных пар «измерение-формуляр», используемых для расчета постоянных пластинок; $\alpha_{catj(k)}$, $\delta_{catj(k)}$ – оценки прямого восхождения и склонения объекта из j-го формуляра каталога; $\alpha_{meainfr(k)}$, $\delta_{meainfr(k)}$ – оценки прямого восхождения и склонения i-го измерения n_{fr} -го кадра; k – номер отождествленной пары «измерение-формуляр»; K_{rej} – коэффициент правила отбраковки пар «измерение-формуляр» из множества опорных звезд.

При $K_{rej} = 1$ для расчета постоянных пластинок (для отбора в опорные звезды) отбираются только пары, модуль отклонения которых меньше среднего значения модуля отклонения отождествленной пары в экваториальных координатах в выбранной совокупности отождествленных пар.

Финальный расчет постоянных пластинок [5 – 7] производится по сформированным и не отбракованным парам измерение кадра – формуляр каталога по окончании третьего этапа метода отбора опорных звезд. В результате использования указанного выше цензурирования претендентов в опорные звезды на исследуемом кадре не всегда опорными становятся самые яркие звезды кадра несмотря на изначально кажущуюся очевидность такого утверждения (рис. 3).

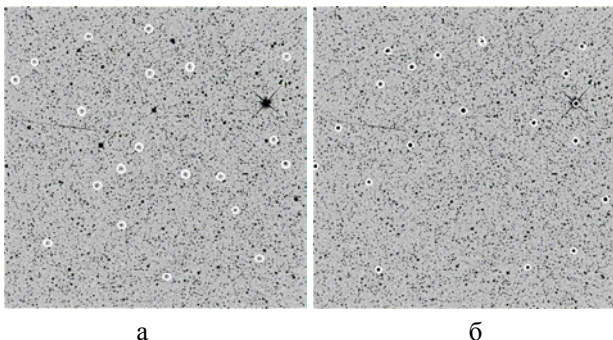


Рис. 3. Отображение на цифровом кадре 20 самых ярких: а – опорных звезд; б – звезд

При проведении исследований предполагались следующие значения констант разработанного вычислительного метода: количество самых ярких измерений кадра и формуляров каталога, которые участвуют при отборе кандидатов в опорные звезды $N_{mia} = 400$, $N_{st} = 600$; предельно допустимое расстояние между соседними объектами (звездами) группы близких объектов $r_{star_group} = 5$; количество фрагментов, на которое делится кадр по каждой координате при отборе опорных звезд $M_{reg} = 4$. На каждом следующем шаге количество измерений увеличивается на $\Delta N_{mia} = 300$ измерений и $\Delta N_{st} = 500$ звезд. Критерием отсутствия

пика является отклонение не более чем на $N_{Apeak} = 4$ значений яркостей пикселей от яркости пикселя пика в области $C_{peak} \times C_{peak}$ ($C_{peak} = 5$) с центром в пике; предельно допустимое расстояние между соседними объектами (измерениями) группы близких объектов $r_{mea_group} = 20$ пикселей; коэффициент правила отбраковки пар «измерение-формуляр» из множества опорных звезд $K_{rej} = 1$.

Показатели точности позиционных измерений положений опорных звезд на цифровом кадре. Предложенный в статье метод выбора опорных звезд, использован в программном обеспечении автоматического поиска астероидов и комет на серии ПЗС-кадров CoLiTec [9, 20]. Результаты ПО CoLiTec [9, 20] подтверждают эффективность и надежность разработанного метода. Обсерватории-пользователи CoLiTec неоднократно входили в ТОП-30 самых продуктивных обсерваторий мира по количеству измерений астероидов. Обсерватория International Scientific Optical Network New Mexico (ISON NM), по суммарным итогам за 2011 и 2012 год, заняла седьмое место в мире, как по количеству измерений, так и по числу открытий астероидов.

Данные достижения обеспечили возможность анализа показателей точности, в том числе и разработанного в статье метода выбора опорных звезд, ПО CoLiTec на основе данных Центра малых планет Гарвардского университета [21]. На рис. 4, 5 представлены показатели точности ведущих астероидных обзоров мира по данным за 2011 и 2012 годы [9, 20]: а – модуль средних отклонений измерений объектов; б – среднеквадратическое отклонение (СКО) оценок положения объектов, пиксели; в – СКО оценок прямого восхождения объектов, угловые секунды; г – СКО оценок склонения объектов, угловые секунды.

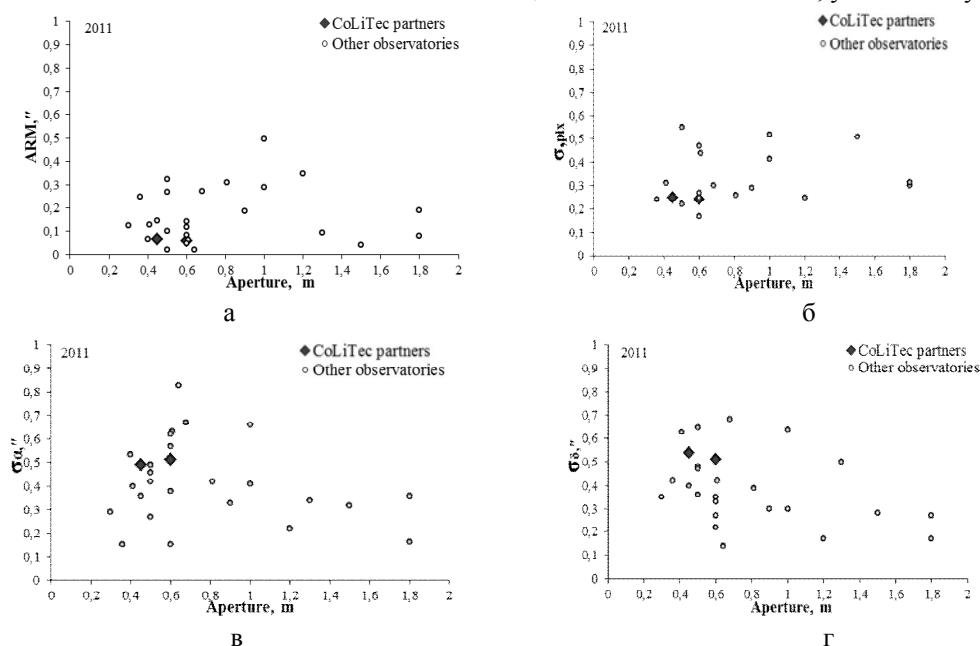


Рис. 4. Ведущие астероидные обзоры мира по данным за 2011 год

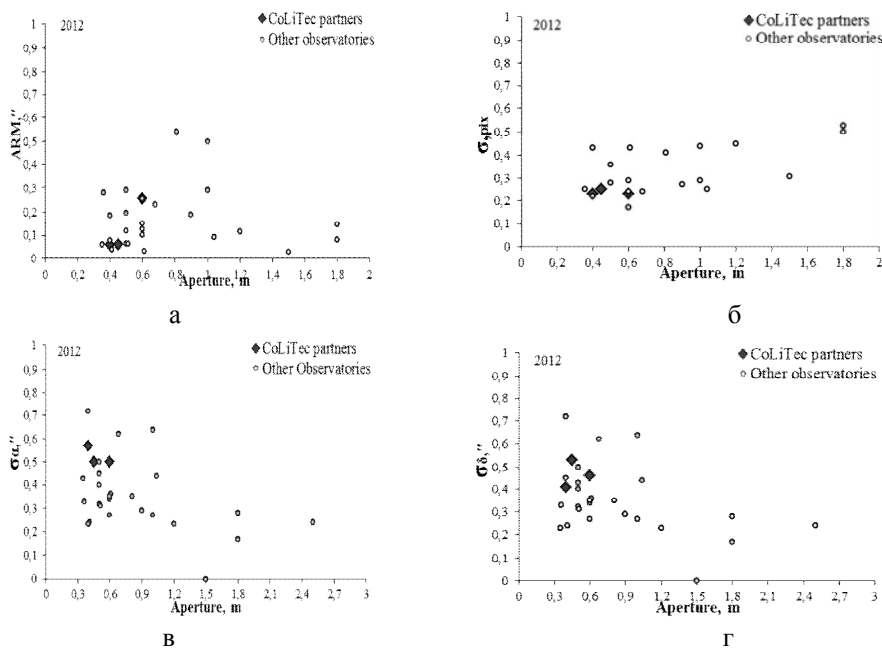
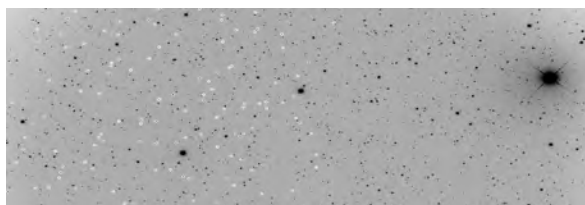


Рис. 5. Ведущие астероидные обзоры мира по данным за 2012 год

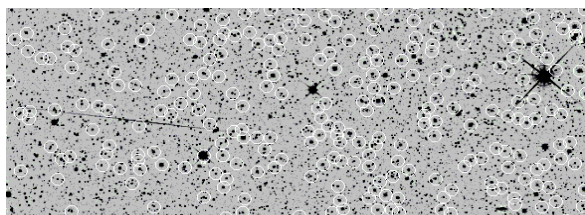
В работе [20] был проведен сравнительный анализ показателей точности астрономических измерений малых тел солнечной системы программными обеспечениями CoLiTec и Astrometrica. При проведении исследования были использованы одни и те же тестовые кадры обработанные с помощью по CoLiTec и Astrometrica.

В результате обработки некоторые кадры не получили надежного отождествления с использованием ПО Astrometrica [9, 20].

Одной из весомых причин было именно то, что на неотожествленных кадрах опорные звезды Astrometrica находились в одной половине кадра (на рис. 8, а опорные звезды отмечены белыми кружками), при равномерном распределении опорных звезд на кадре при использовании CoLiTec (рис. 6, б).



а



б

Рис. 6. Отображение на цифровом кадре: а – опорных звезд ПО Astrometrica; б – опорных звезд ПО CoLiTec

Проведенный анализ показал, частота критических ошибок в ПО CoLiTec ниже, чем у ПО Astrometrica [9, 20], прежде всего, это говорит о том, что в ПО CoLiTec хорошо организован выбор опорных звезд.

При проведении исследования показателей точности опорных звезд использовалась кубическая модель координатной редукции, а каталог UCAC-4 [22] использовался в качестве опорного. Кадры были получены в обсерватории ISON-NM (код MPC H15) 19.03.2013г.

Обсерватория использует 40-см телескоп САНТЕЛ-400АН и ПЗС-матрицу FLI ML09000-65 (3056×3056 пикселей, размер пикселя 12 мкм). Время экспозиции составляло 150 с. Всего было использовано 8 серий по 4 кадра каждая.

Основные показатели точности измерений опорных звезд отображены в табл. 2.

Таблица 2

Основные показатели точности измерений опорных звезд

| Показатель точности | |
|--|--------|
| Выбрано опорных звезд | 16 434 |
| Отклонение лучше 0.25 угл.сек | 99.8% |
| СКО по RA, угл сек | 0.09 |
| СКО по DE, угл сек | 0.09 |
| Квантиль 0.9 модуля отклонений по RA, угл сек | 0.144 |
| Квантиль 0.9 модуля отклонений по DE, угл сек | 0.146 |
| Квантиль 0.99 модуля отклонений по RA, угл сек | 0.187 |
| Квантиль 0.99 модуля отклонений по DE, угл сек | 0.191 |
| Все звезды каталога UCAC-4 на кадре | |
| Всего звезд UCAC4 на кадрах | 44613 |
| Среднее отклонение по RA, угл сек | 0.00 |
| Среднее отклонение по DE, угл сек | -0.01 |
| СКО по RA, угл сек | 0.24 |
| СКО по DE, угл сек | 0.26 |
| Квантиль 0.9 модуля отклонений по RA, угл сек | 0.342 |
| Квантиль 0.9 модуля отклонений по DE, угл сек | 0.375 |
| Квантиль 0.99 модуля отклонений по RA, угл сек | 0.734 |
| Квантиль 0.99 модуля отклонений по DE, угл сек | 0.792 |

Также был проведен анализ отклонений астрономических измерений опорных звезд по прямому восхождению от их блеска, координат на кадре и отношения сигнал-шум (ОСШ). Следует отметить, что при проведении исследований значение ОСШ рассчитывалось как отношение яркости пика к СКО фона. На графиках, представленных на рис. 7 – 9 серыми точками отмечены единичные измерения; крутыми маркерам соответствуют средние значения отклонений на участке анализа; треугольные маркеры ограничивают доверительный интервал, соответствующий трем СКО отклонений соответствующих оценок.

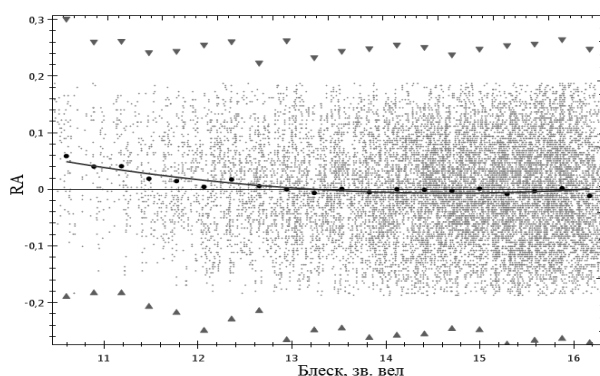


Рис. 7. Зависимость отклонений оценок прямого восхождения опорных звезд от блеска опорных звезд

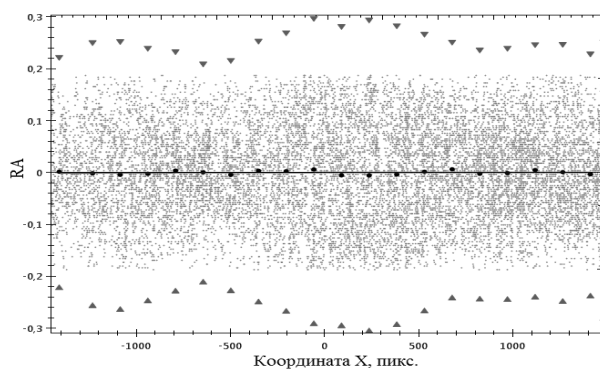


Рис. 8. Зависимость отклонений оценок прямого восхождения опорных звезд от их положения на кадре

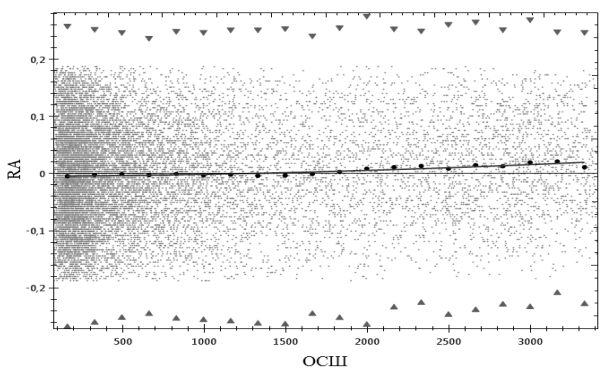


Рис. 9. Зависимость отклонений оценок прямого восхождения опорных звезд от ОСШ

Выводы

В статье разработан многоэтапный вычислительный метод выбора опорных звезд, который учитывает основные особенности процесса формирования астрономических измерений по данным цифровых кадров. Для обеспечения равномерной точности на кадре производится разбиение кадра на фрагменты с независимым выбором кандидатов в опорные звезды из каждого из них. Первоначально формируются линейные постоянные пластинки, которые в основном отождествляют звезды с изображениями в центре кадра.

Для высоких показателей точности делается три этапа отождествления и на двух последних используется кубическая модель постоянных пластинок. Для этого используется большее количество отождествленных пар «измерение-звезда». Для обеспечения надежности используемых в дальнейшем позиционных измерений не менее половины предварительно отождествленных измерений-кандидатов в опорные звезды отбрасывается. Так же перед отождествлением производится отбраковка измерений близких объектов и объектов, изображения которых не имеют пиков. Таким образом, имеет место многоэтапное увеличение порядка постоянных пластинок с одновременным увеличением количества используемых для их расчета пар, цензурированием последних и отбраковкой ненадежных измерений.

Вычислительный метод апробирован в программном обеспечении автоматического поиска астероидов и комет на серии ПЗС-кадров CoLiTec [9, 20]. Разработанный метод обеспечивает высокие показатели точности, что подтверждает надежность и эффективность метода выбора опорных звезд (табл. 2) и астероидов [9].

Приведенные результаты исследований показателей точности позиционных измерений астероидов и опорных звезд на цифровом кадре свидетельствуют о высоких возможностях разработанного метода.

Дальнейшие исследования целесообразно сконцентрировать на оптимизации параметров разработанного метода для различных условий его использования.

Список литературы

1. Rivkin A.S. *Asteroids, Comets And Dwarf Planets* / A.S. Rivkin // Greenwood Press. – 2009.
2. Kortencamp S. *Asteroids, Comets, and Meteoroids* / S. Kortencamp. – Mankato, MN: Capstone Press, 2012. – 360 p.
3. Ericson J. *Asteroids, comets, and meteorites* / J. Ericson // *Cosmic Invaders of the Earth* // New York: Fact on File, 2003.
4. Kallenberg O. *Foundations of Modern Probability* // [Текст] / Kallenberg O. – Springer – 1997 г. – ISBN 0387949577 – 535 с.
5. Дума Д. П. *Загальна астрометрія. Навчальний посібник* / Д.П. Дума – Київ: Наукова думка, 2007. – 600 с.

6. Киселев А.А. Теоретические основания фотографической астрометрии / Киселев А.А. – М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1989. – 264 с.

7. Оценка экваториальных координат астероида по оценкам его координат на ПЗС-кадре / В.Е. Саваневич, А.Б. Брюховецкий, А.М. Кожухов, Е.Н. Диков // Системи обробки інформації: Зб. наук. пр. – Х.: ХУПС, 2010. – Вип. 6 (87). – С. 172 – 179.

8. Программа CoLiTec автоматизированного обнаружения небесных тел со слабым блеском / В.Е. Саваневич, А.Б. Брюховецкий, А.М. Кожухов, Е.Н. Диков, В.П. Власенко // Космічна наука і технологія. – 2012. – Т. 18, № 1. – С. 39 – 46.

9. A new method based on the subpixel Gaussian model for accurate estimation of asteroid coordinates [Текст] / V.E. Savanevych, O.B. Briukhovetskyi, N.S. Sokovikova, M.M. Bezukrovny, I.B. Vavilova, Yu.M. Ivashchenko, L.V. Elenin, S.V. Khlamov, Ia.S. Movsesian, A.M. Dashkova, A.V. Pogorelov // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 2015. – Т. 451 (3). – P. 32.87-32.98.

10. Безкровный М.М. Оценка местоположения объекта на ПЗС-кадре при среднем времени экспозиции / Безкровный М.М., А.М. Кожухов, В.Е. Саваневич, А.Б. Анненков, Соковикова Н.С. // Системи обробки інформації: Зб. наук. пр. – Х.: ХУПС, 2012. – Вип. 7(105). – С. 44 – 50.

11. Дихтяр Н. Ю. Метод отождествления астрономических измерений CCD-кадра с формулярами звездного каталога [Текст] / Н.Ю. Дихтяр, Я.С. Мовсесян, В.Е. Саваневич, А.Б. Брюховецкий. // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н. Е. Жуковского «Харьк. авиац. ин-т». – Вып. 67. – Х., 2015. – С. 197-215

12. Hogg D. W., Automated Astrometry / D. W. Hogg, M. Blanton, D. Lang et al. // Astronomical Data Analysis Software and Systems XVII, R. W. Argyle, P. S. Bunclark, and J. R. Lewis, eds., ASP Conference Series 394, – 2008 p. 27–34

13. Lang D., Hogg D.W., Mierle K. et. al. Astrometry.net: Blind astrometric calibration of arbitrary astronomical images // Astron.J.139:1782, 2010 – P. 46.

14. Lang D., Hogg D. W., Jester S. et. al. Measuring the undetectable: Proper motions and parallaxes of very faint sources // The Astronomical Journal, Volume 137, Issue 5, 2009 – P. 4400-4411.

15. Дихтяр Н.Ю. Метод предварительного отождествления измерений цифровых кадров одной серии / Н.Ю. Дихтяр, Я.С. Мовсесян, В.Е. Саваневич // Збірник

наукових праць. Вісник НТУ «ХПІ», Серія «Нові рішення в сучасних технологіях» – 2015. – №62 (1171) – С. 58 – 63.

16. Дихтяр Н.Ю. Метод аварийного отождествления / Н.Ю. Дихтяр, Я.С. Мовсесян, В.Е. Саваневич С.В. Хламов // Збірник наукових праць. Вісник НТУ «ХПІ», Серія «Нові рішення в сучасних технологіях» – 2016. – Вип. 14. – С. 35-43.

17. Дихтяр, Н.Ю. Декомпозиция общей задачи отождествления астрономических кадров со звездными каталогами на совокупность частных задач / Н.Ю. Дихтяр, Я.С. Мовсесян, В.Е. Саваневич, Е.Н. Диков // Системи обробки інформації. – 2015. – Вип. 9(134). – С. 24 – 29.

18. Мовсесян, Я.С. Метод исследования показателей точности оценок положения опорных звезд CCD-кадров [Текст] / Я.С. Мовсесян, А.Н. Дашкова, В.Е. Саваневич, Н.Ю. Дихтяр, А.В. Погорелов // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н. Е. Жуковского «Харьк. авиац. ин-т». – Вып. 69. – Х., 2015. – С. 189-199.

19. Безкровный М. М. Методы исследования статистических характеристик CCD-измерений положений и блеска объектов солнечной системы [Текст] / М. М. Безкровный, А. Н. Дашкова, Н. С. Соковикова, В. Е. Саваневич, А. Б. Брюховецкий // Восточно-Европейского журнал передовых технологий. – 2015. – Т. 2/2(22). – С. 26 – 37. (Кстати: <http://journals.uran.ua/tarp/issue/view/2415>)

20. Саваневич, В.Е. Сравнительный анализ показателей точности позиционных ПЗС-измерений малых тел солнечной системы программными обеспечениями CoLiTec и Astrometrica / В.Е. Саваневич, А.Б. Брюховецкий, Ю.Н. Иващенко, И.Б. Вавилова, М.М. Безкровный, Е.Н. Диков, В.П. Власенко, Н. С. Соковикова, Я.С. Мовсесян, Н.Ю. Дихтяр, Л.В. Еленин, А.В. Погорелов, С.В. Хламов // Кинематика и физика небесных тел – 2015. – Т. 31, № 6. – С. 55-69.

21. Minor Planet Center, What is the Minor Planet Center? [Электронный ресурс] – режим доступа [www/URL: http://www.minorplanetcenter.net/](http://www.minorplanetcenter.net/) — Загл. с экрана.

22. Zacharias N., Finch C.T. et al. The Fourth US Naval Observatory CCD Astroglyph Catalog (UCAC4). The Astronomical Journal, – 145(2) – 2013.

Надійшла до редколегії 19.05.2016

Рецензент: д-р техн. наук, проф. С.Г. Удовенко, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків.

ОБЧИСЛЮВАЛЬНИЙ МЕТОД ВИБОРУ ОПОРНИХ ЗІРОК НА ЦИФРОВИХ КАДРАХ

В.Е. Саваневич, Я.С. Мовсесян, М.Ю. Діхтяр

У статті розроблено обчислювальний метод вибору опорних зірок на цифрових кадрах, який враховує основні особливості процесу формування астрономічних вимірів за даними цифрових кадрів. Обчислювальний метод апробований в програмному забезпеченні автоматичного пошуку астероїдів і комет на серії ПЗС-кадрів CoLiTec. Розроблений метод вибору опорних зірок забезпечує високі показники точності позиційних вимірювань астероїдів та опорних зірок на цифрових кадрах.

Ключові слова: позиційні вимірювання, постійні пластинки, опорні зірки, цифровий кадр

THE COMPUTATIONAL METHOD OF SELECTING THE REFERENCE STARS ON THE DIGITAL FRAME

V.E. Savanevych, I.S. Movsesian, M.Yu. Dikhtyar

The article developed a computational method for selecting reference stars on digital frames, which takes into account the main features of the formation of astronomical measurements according to data of the digital frame. The computational method is tested in the software automatically search for asteroids and comets on the series of the CCD frames CoLiTec. Also, the method of selecting the reference stars provides high parameters of accuracy positional measurements of asteroids and reference stars on the digital frame.

Keywords: positional measurements, constant plate, reference stars, digital frame.