

УДК 521.95, 523.44, 521.61

Е. С. Козырев, Е. С. Сибирякова, А. В. Шульга

Науково-дослідний інститут «Миколаївська астрономічна обсерваторія», Миколаїв

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ АСТРОМЕТРИЧЕСКОЙ РЕДУКЦИИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ КОМБИНИРОВАННОГО МЕТОДА НАБЛЮДЕНИЙ НЕБЕСНЫХ ОБЪЕКТОВ

Описано комбінований метод спостережень небесних об'єктів та модифікована модель редуції спостережень (ММРС). Наведено методи, використані для оцінки точності координат, отриманих за допомогою ММРС. Представлено оцінку точності спостережень АЗЗ, що наближувалися до Землі на відстані 0.009—0.045 а.е.

ВВЕДЕНИЕ

Комбинированный метод наблюдений (КМН) был разработан в НИИ «Николаевская астрономическая обсерватория» (НИИ НАО) [2] для наблюдений объектов с эфемеридной скоростью более 10"/мин. К ним относятся космические объекты (КО) искусственного происхождения и астероиды, сближающиеся с Землей (АСЗ), включая потенциально опасные для Земли (ПОА) [2]. Для объектов искусственного происхождения эфемеридные скорости составляют от 4"/с на геосинхронных орбитах (36000 км) до 2"/с на низких орбитах (<2500 км), для АСЗ эфемеридные скорости составляют до 10"/с. Суть КМН состоит в том, что изображения наблюдаемого объекта и опорных звезд формируются раздельно, в разных режимах работы ПЗС-камеры или с разным временем экспозиции. Использование изображений опорных звезд и объекта, полученных в разные моменты времени, делает невозможным применение классических моделей определения редуцированных постоянных [1], что потребовало разработки в НИИ НАО модифицированной модели редукиции наблюдений (ММРН) ПЗС-изображений.

В работе представлена модифицированная модель редукиции наблюдений ПЗС изображений, приведена оценка точности наблюдений.

Также была вычислена систематическая поправка для наблюдений КО, где изображения опорных звезд и объекта были получены в разных режимах работы ПЗС-камеры.

ИНСТРУМЕНТ И МЕТОДИКА НАБЛЮДЕНИЙ

В НИИ НАО наблюдения объектов с высокой эфемеридной скоростью проводятся на скоростном автоматическом комплексе [2]. Телескоп с параллактической монтировкой оснащен объективом системы Максудова ($D = 30$ см, $F = 1.5$ м) и ПЗС-камерой «Alta U9000» (3056 × 3056 пкл, 12 × 12 мкм). Поле зрения телескопа 83.2 × 83.2', масштаб без бинирования — 1.63"/пкл, с двойным бинированием — 3.27"/пкл. ПЗС-камера поддерживает два режима работы — режим накопления заряда и режим синхронного переноса заряда (РСПЗ) (time delay integration). В классическом применении РСПЗ экспозиция не изменяется, т. е. объект должен пройти через все поле зрения телескопа. Часто такая экспозиция не требуется, поэтому в НИИ НАО была разработана методика использования РСПЗ с изменяемой экспозицией — режим укороченного переноса заряда. Режим укороченного переноса заряда [4] заключается в том, что во время накопления изображения камера работает в РСПЗ, и после завершения экспозиции происходит считывание сигнала с ПЗС-матрицы с максимальной скоростью. Телескоп оснащен поворотной платформой [3, 4] — устройством, поворачивающим

ПЗС-камеру вокруг оси объектива. Поворотная платформа, поворачивая ПЗС-камеру, располагает столбцы ПЗС-матрицы вдоль направления движения наблюдаемого объекта. Использование поворотной платформы позволяет применять режим синхронного переноса заряда для наблюдений объектов с любым направлением движения. Привязка по времени осуществляется по синхрометру службы времени с точностью 10^{-4} с. Наблюдения проводятся в автоматическом режиме.

При наблюдениях для получения изображений АСЗ используется режим укороченного переноса заряда [4]. Эффективная экспозиция рассчитывается автоматически с учетом эфемеридной скорости, углового размера поля и времени считывания кадров. Так как угол поворота ПЗС-матрицы близок к направлению суточного движения звезд, то для получения изображений опорных звезд тоже применяется режим укороченного переноса заряда, но с меньшей экспозицией. Для изображений опорных звезд экспозиция составляет 10–15 с.

При наблюдениях КО для получения изображений опорных звезд применяется режим накопления с экспозицией 0.5 с, для получения изображений КО применяется режим укороченного переноса заряда, экспозиция рассчитывается так же, как и для АСЗ.

Угол поворота ПЗС-камеры относительно небесного экватора при наблюдениях АСЗ и КО рассчитывается по формуле

$$\beta = \arctg(v_{\delta} / v_{\tau}), \quad (1)$$

где β — угол поворота, v_{τ} — видимая угловая скорость по прямому восхождению, v_{δ} — видимая угловая скорость по склонению.

При использовании КМН выполняются следующие процедуры.

1. Наведение телескопа по предварительно рассчитанным эфемеридам.
2. Поворот ПЗС-камеры по направлению движения объекта с использованием поворотной платформы.
3. Запись изображения с опорными звездами.
4. Запись одного или нескольких изображений наблюдаемого объекта.
5. Запись изображения с опорными звездами.

Во время наблюдения телескоп остается неподвижным. Наблюдения КО проводятся с двойным бинированием для повышения проникающей способности. Запись изображений АСЗ производится без бинирования для получения высокой точности.

МОДИФИЦИРОВАННАЯ МОДЕЛЬ РЕДУКЦИИ НАБЛЮДЕНИЙ

Обработка данных, полученных с использованием КМН, включает четыре этапа:

- 1) первичная обработка изображений (фильтрация);
- 2) вычисление прямоугольных координат объектов в системе ПЗС-матрицы, отождествление опорных звезд и расчет редуцированных постоянных;
- 3) пересчет редуцированных постоянных и экваториальных координат центра изображения на время наблюдения объекта;
- 4) вычисление экваториальных координат наблюдаемого объекта с учетом систематических поправок.

Первичная обработка изображений заключается в постолбцовом и построчном выравнивании фона изображения.

Прямоугольные координаты опорных звезд в системе ПЗС-матрицы определяются с использованием аппроксимации симметричным распределением Гаусса. Задача перехода от прямоугольных координат в системе матрицы к экваториальным решается путем введения идеальных координат ξ , η . Переход от прямоугольных координат в системе матрицы к идеальным осуществляется с помощью кубической модели редукиции. Опорные звезды отождествляются в системе каталога UCAC2.

Для выбора модели редукиции наблюдений, выполненных с применением КМН, проведены исследования влияния модели редукиции на значение $O - C$ для опорных звезд. На телескопе САК были проведены наблюдения 10 кадров в режиме накопления заряда с экспозицией 0.5 с. Далее с применением линейной, квадратичной и кубической моделей редукиции были получены экваториальные координаты звезд и разности $O - C$ с каталогом UCAC2. Используя результаты вычислений, по каждому кадру построены трех-

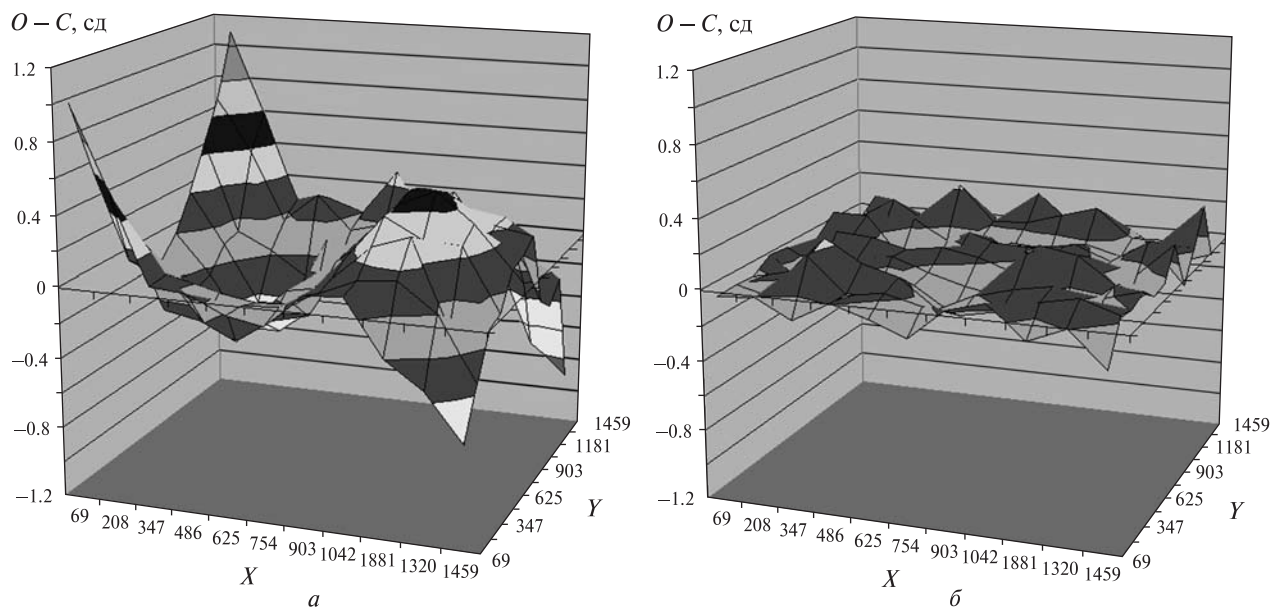


Рис. 1. Распределение $O - C$ по полю ПЗС-матрицы: *a* — для линейной модели редукции, *б* — для кубической модели редукции. Соседние градации серого соответствуют различию на 0.2 сд (секунд дуги)

мерные распределения $O - C$ по прямоугольным координатам. Для линейной и квадратичной моделей редукции была выявлена неравномерность распределений $O - C$ по прямому восхождению и склонению (рис. 1, *a*). Кубическая модель редукции позволила получать равномерное распределение $O - C$ по полю ПЗС-матрицы (рис. 1, *б*).

Неравномерное распределение $O - C$ вызвано несовершенством оптической системы. Как видно из рис. 1, *a*, изображение искажено дисторсией и кривизной поля. Использование кубической модели редукции наблюдений позволяет убрать влияние искажений оптической системы.

Использование кубической модели редукции также позволило улучшить среднее квадратичное отклонение (СКО) положений опорных звезд. Для различных моделей редукции СКО положений приведены в табл. 1. Использование кубической модели редукции позволяет улучшить точность определения положений звезд в 1.4 раза.

Учитывая то, что при использовании КМН изображения опорных звезд и наблюдаемого объекта получают в разные моменты времени,

необходимо найти редукционные постоянные кадра с изображением объекта. Первым этапом является вычисление редукционных постоянных кадров опорных звезд, записанных до и после кадра с изображением объекта. Для этого составляется система кубических уравнений, которая решается методом наименьших квадратов. Для вычисления редукционных постоянных кадра с изображением объекта проводится линейная интерполяция редукционных постоянных и экваториальных координат центров ПЗС-кадров с изображением опорных звезд на момент времени наблюдения объекта. Далее, используя редукционные постоянные кадра с

Таблица 1. Значение средних квадратичных отклонений положений опорных звезд для разных моделей редукции

Модель редукции	СКО _{α}	СКО _{δ}
<i>Наблюдения без бинирования</i>		
Линейная, квадратичная	0.33"	0.32"
Кубическая	0.24"	0.22"
<i>Наблюдения с двойным бинированием</i>		
Линейная, квадратичная	0.39"	0.37"
Кубическая	0.29"	0.27"

объектом и прямоугольные координаты объекта, определяются экваториальные координаты наблюдаемого объекта. Выбор линейной интерполяции обусловлен тем, что при применении квадратичной коэффициенты второй степени несут незначительную погрешность, и в конечном итоге квадратичная интерполяция не повышает точность вычислений.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ МОДИФИЦИРОВАННОЙ МОДЕЛИ РЕДУКЦИИ НАБЛЮДЕНИЙ

Оценка точности ММРН при использовании КМН проводилась тремя способами:

1) проведение тестовых наблюдений звезд в разных режимах работы ПЗС-камеры и с разным временем экспозиции;

2) сравнение экваториальных координат АСЗ с эфемеридой, рассчитанной программой Horizons [<http://ssd.jpl.nasa.gov/horizons.cgi>] на моменты времени наблюдений;

3) сравнение координат навигационных ИСЗ, оснащенных уголковыми отражателями, с эфемеридой ILRS.

Проведение тестовых наблюдений звезд. Тестовые наблюдения звезд с применением КМН проводились в положении поворотной платформы, соответствующей направлению суточного движения звезд, при этом последовательность режимов работы ПЗС-камеры и экспозиций имитировала этапы наблюдения АСЗ или КО.

Проведены тестовые наблюдения с использованием разных экспозиций как при наблюдениях АСЗ (режим укороченного переноса заряда («полоса») с экспозицией 15 с для опорных звезд и режим укороченного переноса заряда («полоса») с экспозицией, соответствующей наблюде-

нию АСЗ). Экваториальные координаты звезд на «полосах», имитирующих наблюдения АСЗ, были получены как классическим методом редукции, так и ММРН. Проведено сравнение координат, полученных двумя методами редукции. Сравнение не показало систематической разности по обеим координатам. Случайная ошибка одного наблюдения звезд 9—14^m составляла $\pm 0.3''$, что соответствует случайной ошибке классической редукции опорных звезд с использованием программы «Astrometrica» [<http://www.astrometrica.at/>].

Также были проведены тестовые наблюдения с чередованием режимов работы ПЗС-камеры, как при наблюдениях КО (режим накопления («кадр») с экспозицией 0.5 с для опорных звезд и режим укороченного переноса заряда («полоса») с экспозицией, соответствующей наблюдению КО). Экваториальные координаты звезд на «полосах», имитирующих наблюдения КО, были получены как классическим методом редукции, так и ММРН. Сравнение показало наличие систематической разности по прямому восхождению, которая составила $1.1'' \text{sec}\delta$. По склонению систематической разности не обнаружено. Тестовые наблюдения проводились сериями по семь «кадров»/«полос» для склонений от -20° до $+60^\circ$ с шагом 20° , для часовых углов от -30° до $+60^\circ$ с шагом 30° и разного бинирования.

В случае применения одинаковых режимов работы ПЗС-камеры для записи изображений опорных звезд и объектов систематической ошибки не выявлено. Учитывая вышесказанное, можно предположить, что причиной систематической ошибки в прямом восхождении при наблюдениях в разных режимах работы ПЗС-камеры является различие в регистрации време-

Таблица 2. Сравнения координат АСЗ, полученных в НИИ НАО, с эфемеридой

Номер АСЗ	Скорость, "/мин		Звездная величина	Расстояние до Земли, а. е.	Количество кадров	Среднее $O - C$, град		СКО $O - C$, град	
	α	δ				α	δ	α	δ
2005RC34	6.5	21.1	14.4	0.037	179	-0.109	-0.117	0.416	0.315
2008TT26	28.8	-36.0	14.7	0.010	75	0.037	0.008	0.410	0.230
2008SV11	15.0	-19.4	12.8	0.045	22	-0.248	-0.183	0.267	0.152
2005YU55	-61.2	21.5	15.3	0.016	29	0.028	-0.095	0.229	0.259
2010JO33	68.3	4.6	15.9	0.009	29	0.102	-0.201	0.377	0.264

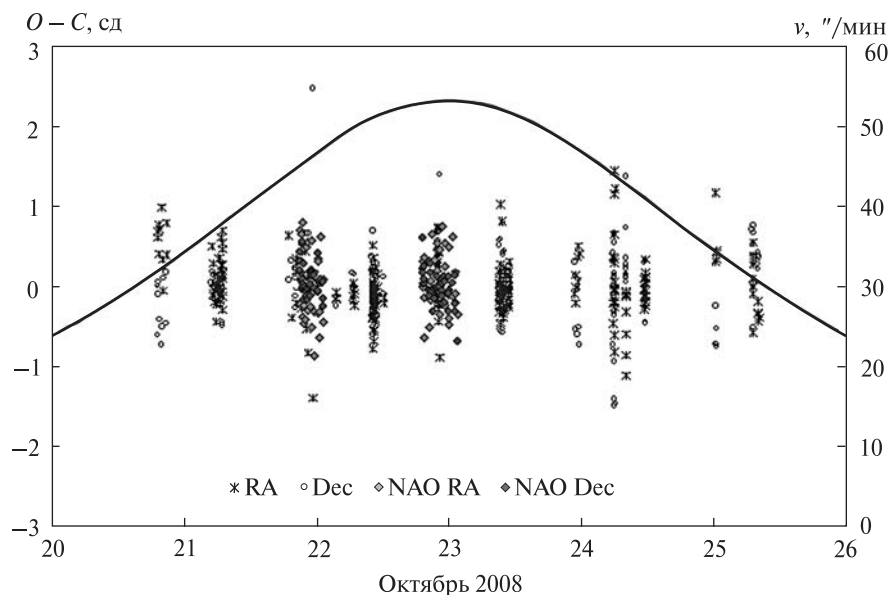


Рис. 2. Значения $O - C$ для АСЗ 2008ТТ26 (октябрь 2008 г.)

ни изображения. Полученная систематическая ошибка учитывается на этапе вычисления экваториальных координат КО.

Сравнение координат АСЗ. В 2008—2010 гг. на телескопе САК проводились наблюдения АСЗ на расстояниях 0.009 — 0.045 а. е. от Земли. Для наблюдений АСЗ и опорных звезд применяется режим укороченного переноса заряда. На основе этих наблюдений было проведено сравнение экваториальных координат, полученных из наблюдений с применением КМН и ММРН, с эфемеридными, рассчитанными программой Horizons [<http://ssd.jpl.nasa.gov/horizons.cgi>]. Результаты сравнения приведены в табл. 2.

Результаты, представленные в табл. 2, в систематическом и случайном отношении соответствуют точности наблюдений других обсерваторий, участвующих в программе астероидно-кометной опасности NEODys. Как пример, для АСЗ 2008ТТ26 на момент сближения с Землей с сайта NEODys [<http://newton.dm.unipi.it/neodys/>] были получены результаты наблюдений разных обсерваторий [<http://newton.dm.unipi.it/neodys/index.php?pc=1.1.7.1&n=2008ТТ26&ab=1>]. Наблюдения проводились с 21 по 23 октября 2008 г., в период времени, когда АСЗ 2008ТТ26 находился на расстоянии порядка 0.0091 — 0.0103 а. е. от Земли. Сравнения значений $O - C$ для

наблюдений НИИ НАО и других обсерваторий представлены на рис. 2. Линией представлено значение эфемеридной скорости АСЗ 2008ТТ26 в наблюдаемый период.

Сравнение координат навигационных ИСЗ. Для проверки точности учета систематической поправки в случае наблюдения опорных звезд и объектов в разных режимах работы ПЗС-камеры (объект — режим укороченного переноса заряда; опорные звезды — режим накопления), проведено сравнение полученных координат навигационных ИСЗ с эфемеридой ILRS. Наблюдения проводились в течении трех ночей, получено 141 положение пяти навигационных ИСЗ. Среднее значение $O - C$ для наблюдений ИСЗ без учета систематической поправки составило 6.6" (СКО = 21.4") по прямому восхождению и 18.9" (СКО = 22.9") по склонению. С учетом систематической поправки среднее значение $O - C$ составило 0.05" (СКО = 0.5") и 0.04" (СКО = 0.6") соответственно. На рис. 3 представлены значения $O - C$ для ИСЗ «Глонасс-102» до (рис. 3, а) и после (рис. 3, б) учета систематической поправки в прямом восхождении. Среднее значение $O - C$ для ИСЗ «Глонасс-102» для наблюдений ИСЗ без учета систематической поправки составило 15.11" по прямому восхождению и 15.21" по склонению (СКО = 19.98" и 16.21").

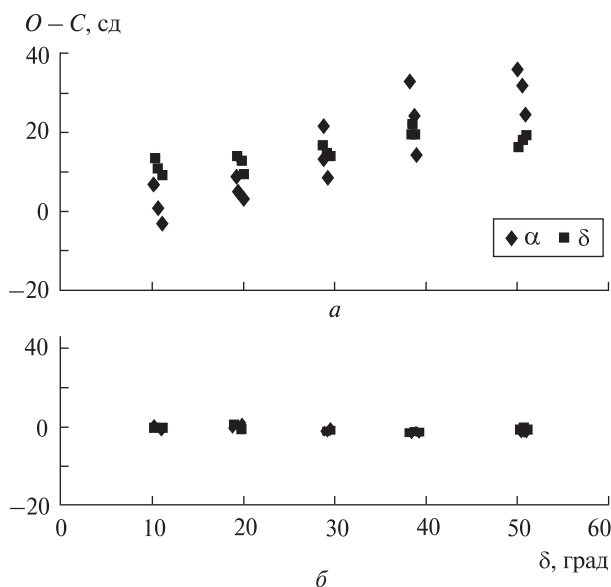


Рис. 3. Значения $O - C$ для ИСЗ «Глонасс-102»: a — без учета систематической поправки, b — с учетом систематической поправки

Значения $O - C$, полученные без учета систематической поправки, соответствуют значению видимой скорости навигационных ИСЗ на момент наблюдений. После учета систематической ошибки среднее значение $O - C$ составило $0.04''$ и $0.09''$ соответственно, при СКО по прямому восхождению $0.27''$ и $0.30''$ по склонению, что подтверждает правильность определения и учета систематической поправки.

ВЫВОДЫ

Разработана модифицированная модель редукции постоянных ПЗС-изображений, обеспечивающая астрометрическую обработку наблюдений, полученных комбинированным методом. Разработан и опробован способ определения систематических поправок при наблюдениях комбинированным методом с режимами работы ПЗС камеры «полоса» — «полоса» и «кадр» — «полоса». При использовании одинаковых режимов работы ПЗС-камеры с разными экспозициями систематической ошибки не выявлено. Получена систематическая поправка в $1.1''$ secδ в прямом восхождении при использовании разных режимов работы ПЗС-камеры. Проведено

сравнение экваториальных координат навигационных ИСЗ с эфемеридой IIRS с учетом и без учета систематической ошибки. Сравнение показало улучшение значений $O - C$, что подтверждает правильность определения систематической поправки. Полученная систематическая поправка учитывается на этапе вычисления экваториальных координат КО. ММРН применён для редукции наблюдений АСЗ, которые наблюдались комбинированным методом на расстояниях от Земли менее 0.05 а. е. Точность полученных координат соответствует мировому уровню точности для такого рода наблюдений.

Авторы благодарны И. В. Каре за предоставленное программное обеспечение для сравнения наблюдений ИСЗ с эфемеридой IIRS.

1. Дума Д. П. Загальна астрометрія: Навчальний посібник. — Київ: Наук. думка, 2007. — 600 с.
2. Ковальчук А. Н., Пинигин Г. И., Шульга А. В. Скоростной автоматический комплекс для регистрации небесных объектов естественного и искусственного происхождения в околоземном космическом пространстве // Околоземная астрономия и проблемы изучения малых тел Солнечной системы. — Москва: ИНАСАН, 2000. — С. 361—371.
3. Козырев Е. С., Сибирякова Е. С., Шульга А. В. Применение поворотной платформы для наблюдений объектов околоземного пространства комбинированным методом // Околоземная астрономия 2007: Сб. тр. конф. — Нальчик, 2008. — С. 288—292.
4. Kozryev Y., Shulga O., Sibiryakova Y. Observation of fast NEA objects with prolonged exposure // A Giant Step: From Milli- to Micro-arcsecond Astrometry: Proc. of IAU Symposium N 248, China, 15—19 Oct. — Shanghai, 2007. — P. 128—129.

Надійшла до редакції 13.07.10

Y. S. Kozryev, Y. S. Sibiryakova, O. V. Shulga

ESTIMATION OF ASTROMETRIC REDUCTION ACCURACY FOR THE COMBINED METHOD OF CELESTIAL OBJECT OBSERVATIONS

The combined method for observations and the modified model of observation reduction are described. We present the methods for the estimation of the coordinate accuracy of coordinates which were obtained with the use of the modified model of observation reduction. The accuracy of observations of the NEOs during their approaches to the Earth for distances from 0.009 to 0.045 AU is estimated.