

УДК 520.88

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

Науково-дослідний інститут «Миколаївська астрономічна обсерваторія», Миколаїв

ТЕЛЕВИЗИОННЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ НИЗКООРБИТАЛЬНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СПОСОБА НАКОПЛЕНИЯ КАДРОВ СО СМЕЩЕНИЕМ

Описано метод спостережень низькоорбітальних навколосемних космічних об'єктів з використанням телевізійних ПЗЗ-камер без супроводу об'єкта телескопом. Основою метода є спосіб накопичення кадрів зі зсувом, який підвищує відношення сигнал/шум зображень об'єктів, що швидко рухаються в полі зору телескопа. Наведено опис обробки кадрів, програмного забезпечення, технічних засобів, що використовуються, та результатів спостережень.

ВВЕДЕНИЕ

Оптические координатные наблюдения низкоорбитальных космических объектов (КО) (высота апогея 200—2000 км) является сложной задачей, поскольку КО имеют большую видимую скорость (0.2—2.0 °/с). Наблюдения низкоорбитальных КО, как правило, проводятся в режиме сопровождения объекта телескопом. Использование значительного времени накопления (>0.1 с) налагает жесткие требования к равномерности скорости сопровождения КО, а также приводит к формированию вытянутых изображений опорных звезд. В связи с этим для наблюдения низкоорбитальных КО обычно используются телевизионные камеры (ТВК) с частотой 25 кадров в секунду. Необходимая пропускательная способность достигается за счет применения объективов с диаметром $D \geq 30$ см, фокусным расстоянием $F \geq 1$ м [1, 3] и полем зрения менее 0.37°. Такой малый размер поля зрения затрудняет наблюдения объектов с большой ошибкой эфемериды, а также уменьшает количество опорных звезд.

Кроме того, одной из проблем использования ТВК для наблюдения КО является наличие

значительной составляющей аддитивного шума в изображении. Накопление кадров повышает отношение сигнал/шум изображения объекта пропорционально корню квадратному из числа складываемых кадров [4]. Однако такой подход применим только к неподвижным изображениям КО в поле зрения телескопа. В НИИ «Николаевская астрономическая обсерватория» (НАО) был реализован способ суммирования кадров со смещением, позволяющий накапливать изображения объектов, движущихся вдоль расчетного направления по полю ТВК. На базе этого способа был разработан метод координатных наблюдений низкоорбитальных КО на неподвижном телескопе. При использовании этого способа процесс сопровождения и накопления изображения КО происходит на цифровом уровне. Таким образом, нет необходимости в механическом сопровождении и применении больших объективов, что значительно упрощает конструкцию телескопа и процесс наблюдения.

Особенностями разработанного метода являются:

- существенное увеличение пропускательной способности за счет применения способа накопления кадров со смещением;
- использование короткофокусных светосильных объективов, обеспечивающих большое поле зрения;

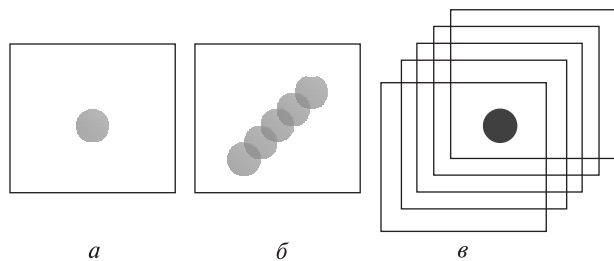


Рис. 1. Иллюстрация наблюдений на ТВ-камере: а — один ТВ-кадр, б — накопление последовательности кадров без смещения, в — накопление кадров со смещением

- неподвижность телескопа во время наблюдения, что существенно упрощает процесс наблюдения;
- использование комбинированного метода наблюдений для определения экваториальных координат объекта по опорным звездам.

СПОСОБ НАКОПЛЕНИЯ КАДРОВ СО СМЕЩЕНИЕМ

Способ накопления кадров со смещением (НКС) был реализован в НИИ НАО для повышения проникающей способности ТВК при наблюдении низкоорбитальных КО на неподвижном телескопе. Способ НКС заключается в суммировании последовательности кадров со смещением изображения каждого кадра, соответствующим смещению объекта в поле зрения телескопа. На рис. 1 схематически представлено изображение быстро движущегося наблюдаемого объекта на одном кадре (рис. 1, а); с накоплением последовательности кадров без смещения (рис. 1, б); и с накоплением последовательности кадров со смещением (рис. 1, в).

Суммирование последовательности кадров производится на момент среднего кадра накапливаемой последовательности T_0 . Величины ΔX_i , ΔY_i смещения изображения вдоль осей X , Y каждого кадра последовательности зависят от разности моментов времени со средним кадром $T_0 - T_i$ и скоростей движения объекта в поле зрения телескопа V_x , V_y :

$$\Delta X_i = (T_0 - T_i)V_x, \quad \Delta Y_i = (T_0 - T_i)V_y.$$

Скорости движения объекта в поле зрения телескопа выражаются в пикселях за секунду и вы-

числяются следующим образом:

$$V_x = \frac{V \cos(\varphi - \beta)}{M_x}, \quad V_y = \frac{V \sin(\varphi - \beta)}{M_y},$$

где V , град/с — угловая скорость объекта; φ , град — угол направления движения КО к плоскости небесного экватора; β , град — угол наклона оси X видимого поля зрения ПЗС-камеры; M_x , M_y , град — угловые размеры пикселя ПЗС-камеры. Угол β для параллактической монтировки постоянен, для азимутальной монтировки зависит от азимута и угла места точки наблюдения.

Угловая скорость КО вычисляется по формуле

$$V = \sqrt{(V_\tau \sec \delta)^2 + V_\delta^2},$$

а угол направления движения КО к плоскости небесного экватора — по формуле

$$\varphi = \arctg \left(\frac{V_\delta}{V_\tau \sec \delta} \right).$$

Здесь V_τ , V_δ — мгновенные скорости объекта в первой экваториальной системе координат.

Наблюдения способом НКС проводятся по предварительно рассчитанным эфемеридам и направлены на уточнение элементов орбит наблюдаемого КО. Эфемерида КО задается в виде последовательности положений в первой экваториальной системе координат T_i , τ_i , δ_i с шагом от 10 с. Мгновенные скорости объекта V_τ , V_δ вычисляются из двух последовательных положений:

$$V_\tau = \frac{\tau_i - \tau_{i-1}}{T_i - T_{i-1}}, \quad V_\delta = \frac{\delta_i - \delta_{i-1}}{T_i - T_{i-1}}.$$

Для наблюдения опорных звезд с использованием способа НКС смещение изображения каждого кадра последовательности рассчитываются так же, как и для КО. Мгновенные скорости опорных звезд в первой экваториальной системе координат составляют $V_\tau = 0.004178$ °/с, $V_\delta = 0$.

Как уже было сказано выше, преимущество накопления кадров по сравнению с использованием обычного видеоряда с частотой 25 кадров/с заключается в повышении отношения сигнал/шум. Это приводит к увеличению вероятности обнаружения КО как наблюдателем, так и в автоматическом режиме, а также к повышению точности вычислений прямоугольных координат.

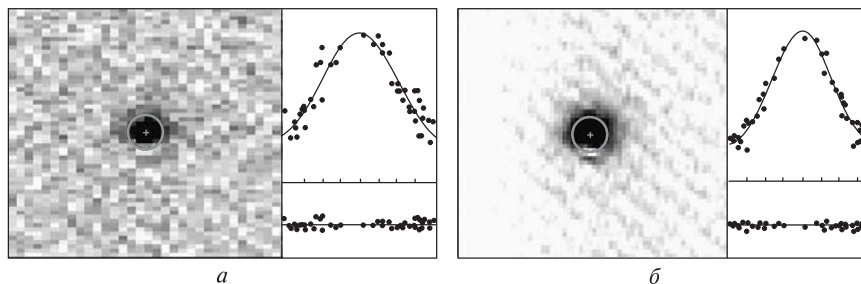


Рис. 2. Профили изображений наблюдаемого объекта: *a* — один ТВ-кадр (ОСШ = 13.0, fit RMS = 0.09); *б* — кадр, полученный в режиме НКС (31 кадр) (ОСШ = 76.7, fit RMS = 0.06)

нат объекта в системе матрицы. Для определения влияния количества складываемых кадров со смещением на качество изображения было проведено сравнение отношения сигнал/шум (ОСШ) и среднего квадратичного отклонения от гауссианы (fit RMS) для изображения низкоорбитального КО, полученного на одном кадре и в режиме накопления кадров со сдвигом. Значения ОСШ и fit RMS определялись программой Astrometrica (<http://www.astrometrica.at/>) и представлены на рис. 2. Результаты сравнения показали, что сложение 31 кадра повышает ОСШ в 5.9 раз, что соответствует корню квадратному из количества складываемых кадров, и улучшает fit RMS в 1.5 раза.

ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ И МЕТОД НАБЛЮДЕНИЯ

С целью уточнения элементов орбит КО в НИИ НАО регулярно проводятся наблюдения на неподвижном телескопе с использованием способа НКС для ТВК. Основное преимущество способа НКС заключается в том, что во время наблюдения телескоп остается неподвижным, а сопровождение и накопление изображения объекта происходит на цифровом уровне. Использование способа НКС позволяет отказаться от сложных и дорогостоящих телескопов с системами механического сопровождения. В НИИ НАО для наблюдения низкоорбитальных КО способ НКС применяется с 2007 г.

Эфемериды для низкоорбитальных КО рассчитываются по элементам орбит, представлен-

ным на сайте SpaceTrack (<http://www.space-track.org/perl/login.pl>) в формате TLE с использованием модели движения SGP4. Наблюдения КО проводятся в нескольких точках на видимом участке орбиты. Телескоп наводится в точку встречи КО и остается неподвижным во время наблюдения. В расчетное время производится запись серии кадров, затем телескоп наводится в следующую точку встречи этого же КО. Время записи серии кадров соответствует времени прохождения КО поля зрения телескопа. Эфемериды КО имеют ошибку, которая возрастает с увеличением разницы между эпохой наблюдения и эпохой элементов орбиты. Рост ошибки эфемериды приводит к увеличению видимого угла отклонения движения КО от расчетной линии, а также к увеличению времени запаздывания/опережения. Допустимый угол отклонения определяется размерами поля зрения. Для компенсации ошибки запаздывания/опережения к времени записи добавляется дополнительное время. Дополнительное время наблюдения выбирается в зависимости от разницы эпохи момента наблюдения и эпохи элементов орбиты: ± 5 с для разницы эпох до 2 сут, ± 10 с — до 7 сут, ± 60 с — свыше 7 сут. Большое дополнительное время наблюдения (± 120 с) используется в случае наблюдений элементов запуска на первых витках после старта ракеты-носителя по начальной неуточненной эфемериде.

Для вычисления экваториальных координат объектов дифференциальным методом применяется комбинированный метод наблюдений

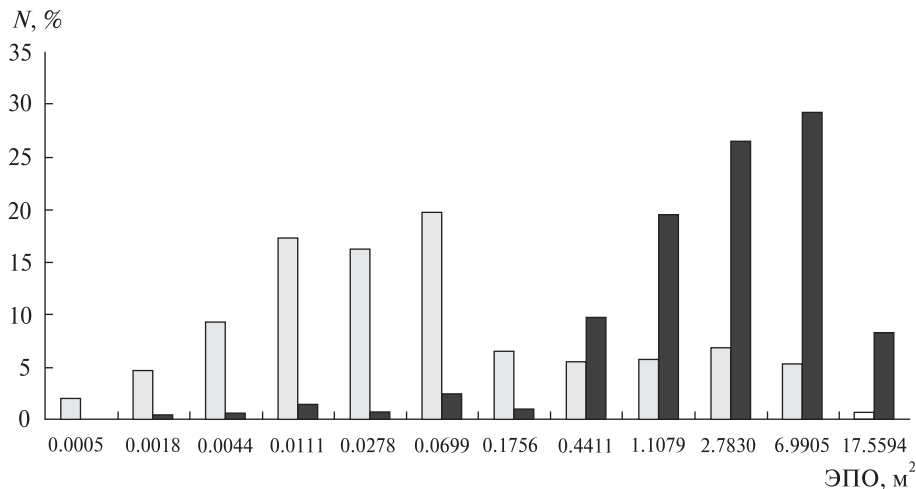


Рис. 3. Распределение относительного количества N низкоорбитальных КО по значениям эффективной поверхности отражения (светлые столбики — список NORAD (1120), темные — список НИИ НАО (277))

(КМН) [2], заключающийся в использовании изображений опорных звезд, полученных отдельно от изображения КО. Изображения КО и опорных звезд формируются в режиме накопления кадров со сдвигом с разными скоростями V_x , V_y движения объекта в поле зрения телескопа. Накопление изображений КО и опорных звезд происходит параллельно, каждый кадр видеопотока прибавляется в оба изображения с разными смещениями. Количество складываемых кадров (время экспозиции) для получения изображения КО вычисляется таким образом, чтобы получить необходимое для уверенного отождествления количество изображений КО (5–9). Во время получения серии изображений КО формируются два изображения опорных звезд, необходимые для вычисления экваториальных координат КО с использованием КМН.

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ И ЭТАПЫ ОБРАБОТКИ

Для проведения и обработки наблюдений в НИИ НАО применяется программный комплекс, состоящий из двух пакетов программ.

Программный пакет подготовки и проведения наблюдений:

- PlanCU — расчет эфемерид КО по элементам орбиты в TLE-формате;

- Control — формирование оптимальной последовательности точек наблюдения КО, минимизация времени наведения и ожидания телескопа. Автоматическое управление процессом наблюдения;

- Motion — наведение телескопа;

- Video — захват и обработка видеопотока в реальном времени. Определение угла β наклона оси X видимого поля зрения ПЗС-камеры и угловых размеров пикселя M_x , M_y . Накопление и сохранение серий накопленных изображений КО и опорных звезд.

Программный пакет обработки наблюдений:

- CCD — обработка серии кадров с изображениями объекта: выравнивание фона, детектирование КО; определение прямоугольных координат в системе ПЗС-матрицы;

- Astrometrica — обработка кадров с изображениями опорных звезд: выделение звезд, определение прямоугольных координат в системе ПЗС-матрицы, отождествление с каталогом;

- Satellite — применение модифицированной модели редукции наблюдений для расчета экваториальных координат КО.

Все программное обеспечение, кроме программ PlanCU и Astrometrica, было разработано в НИИ НАО.

ВНЕДРЕНИЕ МЕТОДА И РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

В НИИ НАО наблюдения низкоорбитальных КО с применением способа НКС проводятся на широкоугольном телевизионном канале телескопа Скоростной Автоматический Комплекс, включающем фотографический объектив ($D = 47$ мм, $F = 85$ мм) и высокочувствительную телевизионную ПЗС-камеру Watec LCL902H (768×576 , 8.3 мкм). Поле зрения широкоугольного канала составляет $4.3 \times 3.2^\circ$, угловой размер пикселя $20''$. При наблюдении КО среднее время экспозиции составляет 2 с, что соответствует накоплению 50 кадров. Для наблюдения опорных звезд среднее время экспозиции составляет 15 с, что соответствует накоплению 375 кадров, при этом предельная звездная величина составляет 12^m .

Размер поля зрения позволяет наблюдать объекты с ошибкой эфемериды до 1° по координатам и до 60 с по времени. Скорость переброски телескопа САК составляет $3^\circ/\text{с}$ по обеим осям, время установки в точку 20 с. Средний период наблюдения в одной точке составляет 120 с, что позволяет на одном видимом участке орбиты КО проводить наблюдения в 1–5 точках в зависимости от времени видимости КО. Привязка по времени осуществляется через синхронизатор службы времени НИИ НАО с точностью 0.0001 с. Методика наблюдений, техническое и программное оснащение позволяют за ночь наблюдать от 20 до 40 объектов с засечкой в среднем в трех точках встречи по видимой дуге КО.

По результатам 2000 наблюдений низкоорбитальных КО за 2008–2009 гг. определена погрешность вычисления экваториальных координат по отношению к кеплеровой орбите с использованием программного специального программного обеспечения [5]. Погрешность определения координат составила ± 1.7 – $8.1''$ для объектов 6 – 11^m .

Для сравнения: в Украинском национальном центре управления и испытания космических средств на телескопе АЗТ 28 ($D = 50$ см, $F = 8$ м), работающем в режиме сопровождения, погрешность наблюдений низкоорбитальных КО составляет ± 15 – $20''$ [3].

Телевизионный канал с применением способа НКС позволяет наблюдать низкоорбитальные

КО с массой от 50 кг и эффективной поверхностью отражения (ЭПО) радиоволн от 0.2 м^2 (45×45 см). На рис. 3 представлено распределение относительного количества объектов по значениям ЭПО для списка низкоорбитальных КО каталога NORAD и списка низкоорбитальных КО, которые наблюдались в НИИ НАО.

ВЫВОДЫ

В НИИ НАО реализован способ накопления кадров со смещением, позволяющий значительно повысить проникающую способность (отношение сигнал/шум) телевизионных ПЗС-камер при наблюдении объектов, подвижных в поле зрения телескопа. С использованием способа НКС разработан и внедрен эффективный и простой в использовании метод координатных наблюдений низкоорбитальных КО. Метод применяется для наблюдений на неподвижном телескопе с использованием телевизионных ПЗС-камер и короткофокусных светосильных объективов.

Наблюдения, получаемые в НИИ НАО с использованием способа НКС, используются для уточнения модели движения низкоорбитальных КО, которая разрабатывается совместно с Одесской астрономической обсерваторией. Данные наблюдений используются также для обеспечения функционирования системы контроля и анализа космической обстановки, которая является составной частью Национальной космической программы Украины. С использованием технических и методических разработок НИИ НАО в Украине была создана сеть оптических телескопов для координатных наблюдений низкоорбитальных КО, включающая в себя НИИ НАО, астрономические обсерватории Одесского, Львовского и Ужгородского университетов.

1. Драгомирецкий В. В., Бурлак Н. Р., Кошкин Н. И. и др. Система регистрации координат быстро движущихся небесных тел на основе наблюдательного комплекса на базе теодолита КТ-50 // Околосемная астрономия — 2003: Тр. конф. — Санкт-Петербург, 2003. — С. 253–256.
2. Ковальчук А. Н., Пинигин Г. И., Шульга А. В. Скоростной автоматический комплекс для регистрации небесных объектов естественного и искусственного происхождения в околоземном космическом про-

- странстве // Околосемная астрономия и проблемы изучения малых тел Солнечной системы. — М.: ИНАСАН, 2000. — С. 361—371.
3. Рыхальский В. В., Лопаченко В. В., Молотов И. Е. Результаты наблюдений космических объектов оптическими средствами Украинского национального центра управления и испытания космических средств в 2006 г. // Радиотехнические тетради. — 2008. — № 36. — С. 14—16.
 4. Стрелков А. И., Барсов В. И., Стрелкова Т. А., Кац Е. Н. Оценка эффективности метода накопления серии короткоэкспозиционных слабоконтрастных телевизионных кадров // 36. наук. праць Харків. ун-ту Повітряних Сил ім. І. Кожедуба. — 2007. — Вип. 1(13). — С. 44—47.
 5. Vazyey O. A., Sibiryakova E. S., Shulga A. V. The method for fast determination of geostationary Earth satellite orbit

from angular coordinates measurements // Odessa Astron. Pubs. — 2005. — 18. — P. 8—14.

Надійшла до редакції 14.10.10

Ye. S. Kozryrev, Ye. S. Sybiryakova, A. V. Shulga

TV OBSERVATIONS OF LOW EARTH ORBIT OBJECTS USING FRAME ACCUMULATION WITH SHIFT

A method for observations of low Earth orbit objects with a TV CCD camera is suggested. The method can be used for telescope observations without object tracking and is based on the frame accumulation with shift. Such frame accumulation allows one to increase the signal/noise ratio for the objects moving fast in the field of view. The frame processing, software, used hardware and observation results are described.