

УДК 524.7:520.27;523:520.27

## РАЗВИТИЕ ЭФЕМЕРИДНОЙ ПОДДЕРЖКИ НАБЛЮДЕНИЙ УДАЛЁННЫХ РАДИОИСТОЧНИКОВ И ОБЪЕКТОВ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ НА РАДИОТЕЛЕСКОПЕ РАТАН-600

© 2012 А. Н. Коржавин<sup>1\*</sup>, В. Н. Львов<sup>2</sup>, С. Х. Тохчукова<sup>1</sup>, С. Д. Цекмейстер<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский филиал Специальной астрофизической обсерватории РАН,  
Санкт-Петербург, 196140 Россия

<sup>2</sup>Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, 196140 Россия

Поступила в редакцию 17 августа 2011 года; принята в печать 20 октября 2011 года

Приведено краткое описание новых элементов алгоритмической и программной основы эфемеридной поддержки наблюдений удалённых радиоисточников и объектов Солнечной системы на радиотелескопе РАТАН-600.

Ключевые слова: радиоконтинуум — методы: наблюдательные: радиоастрономия

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Программы эфемеридной поддержки наблюдений объектов дальнего космоса и тел солнечной системы на радиотелескопе РАТАН-600 (ЭФРАТ), созданные в Институте теоретической астрономии и прослужившие более 30 лет [1–3], перестали в полной мере соответствовать возросшим потребностям практики. В частности, они не поддерживали режим многоазимутальных наблюдений на южном секторе РАТАН-600 с перископическим отражателем, который был введен в регулярное пользование с 2000 г. [4–6]. Появление новых спектрально-поляризационных радиометрических комплексов высокого разрешения и, как следствие, новых высокопроизводительных систем регистрации и автоматизированной обработки данных потребовало расчета дополнительных параметров наблюдаемых источников в современных операционных системах Windows и Linux (ЭФРАТ был рассчитан на работу в ОС DOS). Всё это обусловило появление новой версии программы — ЭФРАТ-2, включающей в себя новые элементы алгоритмической основы, а также усовершенствованные программные средства — графический интерфейс пользователя Windows, поддержку запуска из командной строки в Linux, и веб-интерфейс для удалённой работы с программой.

### 2. ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ АЛГОРИТМЫ

Алгоритмические основы эфемеридной поддержки наблюдений на круговом отражателе радиотелескопа РАТАН-600 даны в [1]. В настоящей

работе осуществлён переход к современным, более точным стандартам численных эфемерид Солнца, Луны и планет (DE405/LE405) и элементов вращения для вычисления координат деталей их поверхностей. Предложены также удобные схемы адаптации данных различных каталогов удалённых радиоисточников.

Наблюдения на южном секторе с плоским отражателем имеют свои особенности [4]. Методика расчета основных эфемерид в этом режиме в азимутах с учетом рефракции была впервые разработана А.Н. Коржавиным и апробирована на практике при выполнении первых наблюдений Солнца в азимутах в июле 1982 г. [5]. Общая схема наблюдений показана на Рис. 1.

Поток излучения от радиоисточника (на схеме — отрезок 1) отражается от плоского зеркала (прямоугольник серого цвета) и направляется (отрезок 2) на южный сектор главного зеркала

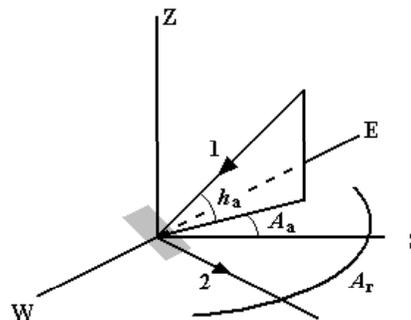


Рис. 1. Схема наблюдений на южном секторе с плоским отражателем.

\*E-mail: kor@saoran.spb.su

радиотелескопа, который совместно с облучателем, движущимся по круговым рельсам, работает в режиме наблюдений источника с нулевой высотой над горизонтом. Отражающие элементы плоского отражателя имеют только одну степень свободы — они могут вращаться вокруг горизонтальной оси для необходимой его установки. Обозначим через  $h_f$  удвоенное значение угла между нормалью плоского зеркала и плоскостью горизонта, которое будет использовано в дальнейшем. При наблюдениях центр диаграммы направленности радиотелескопа должен совпадать с положением источника на небесной сфере, поэтому можно считать, что величины  $A_a, h_a$  — их общие азимут и высота. Наконец,  $A_r$  — азимут для установки элементов главного зеркала. Перечисленные величины связаны между собой формулами [5]:

$$\begin{aligned}\cos(h_f + \varphi) &= -\sin \delta / \cos A_r \\ \sin t &= -\sin A_r / \cos \delta \\ \tan A_a &= -\tan A_r / \cos h_f \\ \sin h_a &= \sin h_f \cos A_r \\ \sin \omega &= -\tan \delta \tan A_r,\end{aligned}\quad (1)$$

где  $\varphi$  — широта места наблюдения,  $\delta, t$  — склонение и часовой угол источника,  $\omega$  — угол, который “нож” диаграммы направленности образует с кругом склонений.

Видимое смещение объекта, вызванное нормальной рефракцией, не влияет на момент его прохождения через заданный вертикал в режиме “АПП”. Однако при наблюдениях с перископом картина иная. Здесь проекция указанного смещения на круг склонений будет иметь величину  $\Delta h \cos q$ , где  $\Delta h$  — вертикальная рефракция, а  $q$  — параллактический угол, т.е. угол при источнике между направлениями на полюс мира и местный зенит. Поэтому схема итераций будет выглядеть так. Пусть  $\lambda$  — долгота места,  $\alpha_1, \delta_1$  — видимые экваториальные координаты объекта на начало суток,  $S$  — гринвичское звёздное время,  $S_0$  — звёздное время в 0 часов всемирного времени,  $T$  — всемирное время. Тогда по формулам (1) находим первое приближение основных величин  $h_{f1}, h_{a1}, t_1$ . Затем определяем звёздное время  $S_1$  и всемирное время  $T_1$ :

$$\begin{aligned}S_1 &= \alpha_1 + t_1 - \lambda; \\ T_1 &= 0.997270(S - S_0).\end{aligned}\quad (2)$$

Далее с вычисленными координатами объекта на новый момент времени и с исправленным склонением, т.е. с величинами  $\alpha_2 = \alpha(T_1)$ ,  $\delta_2 = \delta(T_1) + \Delta h \cos q$ , осуществляется следующий шаг вычислений. Итерации завершаются, если модуль разности моментов  $T_{k+1} - T_k$  станет меньше некоторой наперёд заданной величины. После

этого вычисляются момент поясного времени и величина радиорефракции как функция высоты объекта и параметров атмосферы. При этом программа выявляет случаи, когда объект в заданном азимуте не наблюдается на заданную дату (пропуски дат у Луны даже при допустимом склонении), или когда имеют место два прохождения в сутки через заданный вертикал (планеты и удалённые радиоисточники), и учитывает это в выводе.

В новой версии предусмотрено также вычисление моментов прохождения через диаграмму направленности краёв диска значительных угловых размеров. “Нож” диаграммы направленности РАТАН-600 в режиме “Перископ” ориентирован вдоль круга склонений, а в остальных режимах работы он вертикален. Поэтому следует использовать выражения для производных от часового угла и азимута по звёздному времени [7]:

$$\begin{aligned}i &= \frac{dt}{ds} = 15 - \dot{\alpha} \\ \dot{A} &= \frac{dA}{ds} = \frac{(15 - \dot{\alpha}) \cos \delta \cos q + \dot{\delta} \sin q}{\cos h}.\end{aligned}\quad (3)$$

Здесь  $\dot{t}, \dot{A}, \dot{\alpha}, \dot{\delta}$  — производные от часового угла, азимута, прямого восхождения и склонения источника соответственно (выраженные в arcsec/s),  $q$  — параллактический угол. Производные отнесены к одной единице, например, к секунде звёздного времени. Тогда изменения часового угла и азимута источника в секундах дуги за промежутки звёздного времени  $\Delta s$  секунд будут равны:

$$\Delta t = i \Delta s, \quad \Delta A = \dot{A} \Delta s.\quad (4)$$

Если измеряется не звёздное, а среднее солнечное время, то соответствующие величины нужно умножить на коэффициент  $1 - \nu = 0.997270$ . Используя формулу (4), можно найти промежуток времени, за который источник пересечёт диаграмму направленности:

$$\Delta s_t = \frac{2R}{i \cos \delta}, \quad \Delta s_A = \frac{2R}{\dot{A} \cos h}.\quad (5)$$

Таким образом, в первом приближении момент времени прохождения западного или восточного краёв диска опережает или отстаёт от момента, соответствующего центру диска, на половину указанного промежутка.

На Рис. 2 изображены различные варианты прохождения объекта с видимым радиусом  $R$  через ножевую диаграмму направленности, ориентированную вдоль линии, которая составляет с кругом склонений упомянутый в выражении (1) угол  $\omega$ . Здесь OF — суточная параллель, FP — круг склонений, FA — “нож” диаграммы направленности, AFP — угол  $\omega$ . Очевидно, что при суточном движении первый контакт видимого диска с диаграммой

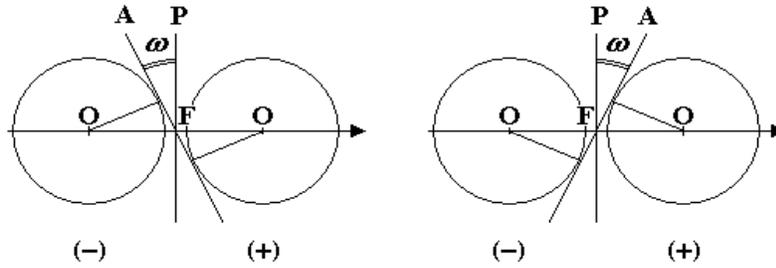


Рис. 2. Прохождение объекта с видимым радиусом  $R$  через ножевую диаграмму направленности.

произойдет раньше, а последний — позже предвычисленных на величину, которую можно оценить по формуле

$$\Delta s = \frac{R(\sec \omega - 1)}{(15 - \dot{\alpha})} \quad (6)$$

Если на поверхности Солнца, Луны или планеты в какой-либо момент времени  $T$  зафиксирована деталь, а также определены её полярные координаты  $\rho$  — угловое расстояние от центра видимого диска и  $\theta$  — позиционный угол направления на деталь из центра диска, то можно получить планетографические долготу  $l$  и широту  $b$  детали по формулам:

$$\begin{aligned} \rho_1 &= \arcsin(\rho/R), \\ b &= \arcsin(\sin b_0 \cos \rho_1 + \cos b_0 \sin \rho_1 \cos(\theta_0 - \theta)), \\ l &= \arcsin(\sin \rho_1 \sin(\theta_0 - \theta) / \cos b) + l_0. \end{aligned} \quad (7)$$

Здесь  $R = R(T)$  — видимый радиус планеты,  $l_0 = l_0(T)$ ,  $b_0 = b_0(T)$ ,  $\theta_0 = \theta_0(T)$  — долгота и широта центра диска планеты и позиционный угол направления на её северный полюс (см. Рис. 3). Имея планетографические координаты детали, легко вычислить её видимые экваториальные координаты и получить эфемериду для наблюдений.

Предусматривается специальный режим для мониторинга быстродвижущихся объектов, когда сходимость описанных итераций неочевидна. К таким объектам относятся астероиды и кометы, сближающиеся с Землёй, которые, возможно, придётся отслеживать в совместных сеансах радиолокации. На Рис. 4 представлена траектория видимого движения по небесной сфере астероида Апофис при его тесном сближении с Землёй 13–14 апреля 2029 года.

### 3. ПРОГРАММА ЭФРАТ-2

Описанные алгоритмы реализованы в разработанной в ГАО РАН программе ЭФРАТ-2 для эфемеридной поддержки наблюдений удалённых радиоисточников и объектов Солнечной системы на РАТАН-600. Программа частично использует

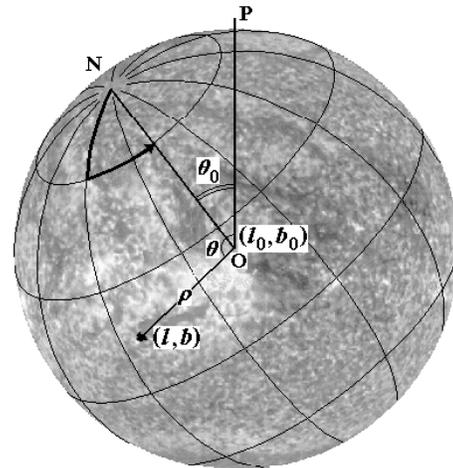
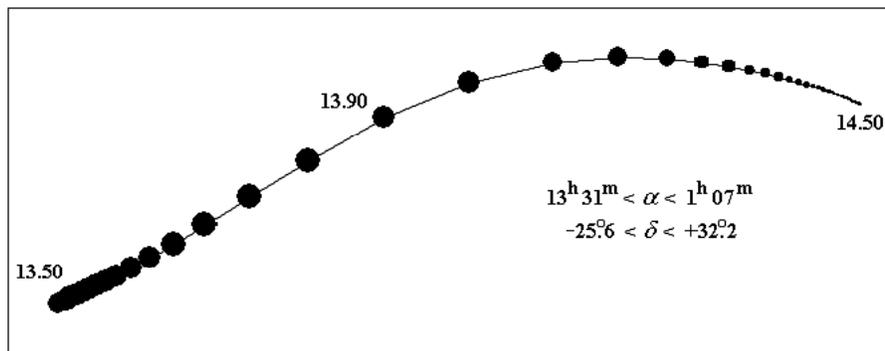


Рис. 3. К определению планетографических координат детали поверхности. P — северный полюс мира, N — северный полюс планеты.  $\rho$  и  $\theta$  — полярные координаты детали на поверхности объекта,  $l$  и  $b$  — её планетографические координаты.

среду ПП ЭПОС [8], работает в трёх режимах, соответствующих режимам работы телескопа (условно названных “АПП”, “Перископ”, и “Сопровождение”), имеет двуязычный интерфейс (русский и английский) и скомпилирована в двух вариантах — для работы в ОС Windows и Linux. Программа имеет встроенную справочную службу, где подробно описаны её возможности. Здесь мы коснемся их только вкратце.

Долговременные установки производятся с помощью строки меню. Здесь можно изменить набор азимутов для режима “Перископ”, параметры для вычисления радиорефракции, задать координаты места наблюдения в различных форматах, при необходимости активизировать флаг перехода на летнее время. Кроме того, интерфейс можно переключить с русского на английский язык и обратно, а также получить информацию о работе программы.

Координаты удалённых радиоисточников можно определить двумя способами: либо задать символичный файл, где они содержатся (вместе с форматами данных), либо указать на какой-либо суще-



**Рис. 4.** Траектория видимого движения астероида Апофис при его тесном сближении с Землёй до расстояния около 39 тыс. км 13–14 апреля 2029 года. Цифры вдоль траектории обозначают дату и ее дробную часть. Кружки соответствуют положению объекта на небесной сфере через каждые 30 минут, их размер — блеску объекта в соответствующий момент. Под кривой приведены интервалы изменения прямого восхождения и склонения за указанные сутки.

ствующий каталог радиоисточников, формат данных которого должен быть описан в специальном файле (паспорте) этого каталога. В документации приведены примеры таких файлов. Это даёт возможность пользователю самому адаптировать каталоги радиоисточников, с которыми он постоянно работает, и легко переключаться на любой из них. Все файлы-паспорта должны находиться в специальной папке для того, чтобы программа их “увидела”.

Оперативный контроль данных осуществляется с помощью других элементов управления, расположенных на экране. Три переключателя — “Перископ”, “АПП” и “Сопровождение” настраивают программу на подготовку эфемерид для наблюдений в трёх основных режимах работы радиотелескопа. В режиме “Перископ” предусмотрено вычисление эфемерид для многих значений азимута в одном сеансе наблюдений — общим числом до 61. По умолчанию это интервал  $\pm 30^\circ$  с шагом в  $1^\circ$ , из которого можно выбрать отдельные азимуты или задать все. Как указано выше, набор рабочих значений азимута можно изменить. В остальных двух режимах эфемериды вычисляются для двенадцати фиксированных азимутов с шагом  $30^\circ$ . Задание указанных азимутов осуществляется с помощью соответствующих групп. Здесь же расположены остальные элементы управления, с помощью которых можно управлять установкой различных шкал времени, задавать календарную дату наблюдений, количество суток, а также шаг по времени для режима “Сопровождение”, в котором эфемериды вычисляются для некоторого множества моментов в окрестности момента прохождения через вертикаль, соответствующий заданному азимуту.

Объект выбирается с помощью специальной экранной формы. Удалённый радиоисточник может быть задан в экваториальной или галактической системе координат. При этом нужно выбрать необходимый формат из списка и ввести координаты,

отнесённые к избранным экватору и равноденствию. Возможен формальный учёт собственного движения, хотя для большинства удалённых источников это не актуально. Объект Солнечной системы можно выбрать с помощью одноимённого списка, выделив в нём нужную строку. Кроме центра диска планеты можно вычислить эфемериду точечного источника на её поверхности. Это достигается заданием либо планетографических (долгота и широта), либо планетоцентрических координат (прямоугольные или полярные координаты в угловой мере). Во втором случае требуется дополнительно задать момент времени, к которому отнесены планетоцентрические координаты с тем, чтобы корректно перевести их в планетографические — основные координаты для вычисления эфемерид.

Предусмотрена возможность работы с файлами, содержащими эфемериды объектов, вычисленные с помощью других программ. К таким объектам относятся, например, астероиды и кометы (в особенности сближающиеся с Землёй). При таком подходе нет необходимости расширять возможности вычислительных программ и значительно увеличивать объём данных.

Программа позволяет изменять формат некоторых выходных данных. В окне вывода результатов помещается вся полученная в процессе вычислений информация в соответствии с выбранным режимом работы. Первые три строки — это заголовок списка. В том случае, если объект не наблюдается на заданную дату в заданном азимуте или деталь поверхности находится на невидимой стороне объекта, информация записывается в “карман” для исключений, расположенный под основным списком. При записи в файл эта информация дописывается в конец данных. Для всех режимов работы выводятся следующие величины: календарная дата, время поясное сезонное, азимут радиоисточника, высота радиоисточника, видимое прямое восхождение, видимое склонение, звёздное

(среднее) время, рефракция в секундах дуги, нутация в прямом восхождении в секундах времени, позиционный угол направления движения радиосточника в градусах, позиционный угол диаграммы направленности в градусах, скорости изменения азимута и высоты в секундах дуги за секунду звёздного времени. Для режима “Перископ” дополнительно вычисляются азимут приёмника излучения и высота перископа. Для высоты установки перископа, азимута и высоты источника возможен вывод в двух форматах: градусы и доли градуса, а также градусы, минуты, секунды и доли секунды дуги. Опционально можно вывести моменты контактов диска с “ножом” диаграммы направленности, а также некоторые дополнительные параметры: видимый радиус, долгота и широта центра видимого диска, угловое расстояние северного полюса от центра диска и позиционный угол направления на него.

В Windows-версии программы ЭФРАТ-2 можно выделить один или несколько символов в какой-либо строке вывода и, нажав специальную кнопку “Лупа”, получить изображение видимого диска для объекта Солнечной системы на момент, соответствующий помеченной строке.

Создание Linux-версии программы с запуском из командной строки позволило интегрировать счет эфемерид в автоматизированную информационную систему наблюдений Солнца на РАТАН-600 [9]. Веб-интерфейс для удаленной работы с программой ЭФРАТ-2 (в настоящее время только для режима “Перископ”) представлен по адресу: <http://www.spbf.sao.ru/cgi-bin/ion-p?page=efrat.ion>.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность В. М. Богоду и В. Н. Боровик за содействие в работе и полезные обсуждения. Работа проводилась при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (госконтракты по. 16.518.11.7062, 16.552.11.7028).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. В. Н. Львов, Алгоритмы небесной механики (материалы математического обеспечения ЭВМ), ИТА АН СССР, вып. 12, (Ленинград, 1976)
2. Н. И. Глебова, Алгоритмы небесной механики (материалы математического обеспечения ЭВМ), ИТА АН СССР, вып. 38, (Ленинград, 1982)
3. М. А. Фурсенко, Алгоритмы небесной механики (материалы математического обеспечения ЭВМ), ИТА АН СССР, вып. 41, (Ленинград, 1982).
4. О. Н. Шиврис, Астрофизические исследования (Изв. САО АН СССР) 12, 134 (1980).
5. В. М. Богод и др., Отчёт САО АН СССР №. 112 (1983); [http://www.spbf.sao.ru/prognoz/papers/otchet\\_sao\\_1983.pdf](http://www.spbf.sao.ru/prognoz/papers/otchet_sao_1983.pdf).
6. В. М. Богод, Г. Н. Жеканис, М. Г. Мингалиев, С. Х. Тохчукова, Изв. ВУЗов, Серия Радиофизика 47, 255 (2004).
7. С. Н. Блажко, *Курс сферической астрономии* (ОГИЗ, Москва, 1948)
8. В. Н. Львов, С. Д. Цекмейстер, Изв. ГАО 219, 179 (2009)
9. С. Х. Тохчукова, Астрофизический бюллетень 66, 379 (2011)

## DEVELOPMENT OF EPHEMERIS SUPPORT IN OBSERVATIONS OF DISTANT RADIO SOURCES AND SOLAR SYSTEM OBJECTS AT RATAN-600 RADIO TELESCOPE

A. T. Korzhavin, V. N. Lvov, S. Kh. Tokhchukova, S. D. Tsekmeister

New elements of the algorithmic and software bases of the ephemeris support for the RATAN-600 radio telescope observations of distant radio sources and objects of the Solar system are briefly described.

Keywords: *radio continuum: general—methods: observational: radio astronomy*