

Планирование и обработка радиолокационных наблюдений в Институте прикладной астрономии РАН

© Ю. С. Бондаренко, Д. А. Маршалов

ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

ИПА РАН регулярно проводит радиолокационные наблюдения астероидов, комет и космических аппаратов с использованием 32-метровых радиотелескопов РТ-32 РСДБ-сети «Квазар-КВО». Источниками радиосигналов являются планетарные локаторы Центра дальней космической связи «Goldstone» (США) и радиотелескопы Национальных астрономических обсерваторий (КНР). Оперативное планирование, обработка и анализ астрономических радиолокационных наблюдений выполняется на специально созданном комплексе программ.

Основной задачей, решаемой при планировании наблюдений, является определение совместных наблюдательных окон, величины доплеровского смещения частоты регистрируемого сигнала и оценка отношения сигнал/шум для исследуемого объекта и заданной конфигурации передающей и приемной антенных систем. Обработка радиолокационных наблюдений выполняется с учетом вычисленных эфемерид и протокольных файлов системы управления радиотелескопа. В результате вычисляются спектры мощности зарегистрированных эхо-сигналов. Анализ этих спектров позволяет определять размеры, форму, параметры вращения, свойства поверхности и уточнять элементы орбит исследуемых объектов.

Ключевые слова: околоземные объекты, астероиды, радиолокационные наблюдения, эхо-сигнал, анализ спектров мощности.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.47.3-7>

Введение

На сегодняшний день радиолокация является одним из наиболее точных методов, позволяющих получать информацию о динамических и физических свойствах околоземных объектов. ИПА РАН регулярно участвует в радиолокационных наблюдениях, используя 32-метровые радиотелескопы РТ-32 в обсерваториях «Светлое», «Зеленчукская» и «Бадары», которые входят в состав российской радиоинтерферометрической сети со свехдлинными базами (РСДБ-сети) «Квазар-КВО» [1]. В зависимости от характеристик исследуемого околоземного объекта, передатчиком, как правило, выступает 70-метровая антенна (DSS-14) Центра дальней космической связи «Голдстоун» (Goldstone) в США или 66- и 35-метровые локаторы станций дальней космической связи Jiamusi и Kashi в Китае. Для проведения и планирования радиолокационных наблюдений околоземных объектов с помощью РСДБ-сети «Квазар-КВО» и обработки эхо-сигналов был создан программный комплекс.

Планирование наблюдений

При планировании радиолокационных наблюдений определяются совместные зоны видимости, вычисляется величина доплеровского смещения частоты регистрируемого сигнала и оценивается отношение сигнал/шум ($C/Ш$) для исследуемого объекта и заданной конфигурации передающей и приемной антенных систем. Объект задается элементами орбиты на выбранную начальную эпоху и физическими параметрами (диаметром D , периодом вращения P и радиолокационным альбедо $\hat{\sigma}$). Параметрами передающей и приемной антенных систем являются их топоцентрические координаты, диаметр и коэффициент использования поверхности антенн η , мощность P_{Π} и частота f_0 сигнала передатчика, шумовая температура T_{Π} и минимальный угол места приемной антенной системы. При расчетах в программном комплексе используется численная теория движения планет DE423, поправки к параметрам вращения Земли (координаты полюса, прецессия, нутация и всемирное время), а также учитываются время прохождения сигнала, суточная и годичная абберрации, релятивистское отклонение света и тропосферная задержка.

Для каждой зоны видимости с заданным шагом по времени вычисляются прямое восхождение и склонение, азимут и угол места, расстояние до объекта и скорость изменения расстояния, видимая звездная величина, углы элонгации Солнца и Луны, освещенность объекта Солнцем, величина доплеровского смещения частоты эхо-сигнала f_D , время распространения сигнала $\Delta\tau$ и оценка $C/Ш$, полученная на этом интервале времени.

Оценка $C/Ш$ определяется как отношение $P_{\Pi}/\Delta P_{ш}$, где P_{Π} — мощность принятого эхо-сигнала, а $\Delta P_{ш}$ — дисперсия шумов приемника. Мощность P_{Π} принятого эхо-сигнала можно получить из уравнения радиолокации [2]:

$$P_{\Pi} = \frac{P_{\Pi} G_{\Pi} G_{\Pi} \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4},$$

где G_{Π} и G_{Π} — коэффициенты усиления передающей и приемной антенн; λ — длина волны излучения; σ — эффективная площадь рассеяния цели; R — расстояние от передающей антенны до исследуемого объекта. Коэффициент усиления антенны определяется площадью собирающей поверхности A и коэффициентом η по формуле $G=4\pi\eta A/\lambda^2$. Сфера с диаметром D и радиолокационным альбедо $\hat{\sigma}$ имеет эффективную площадь рассеяния $\sigma = \hat{\sigma} \pi D^2 / 4$. Дисперсия шумов приемника:

$$\Delta P_{ш} = k T_{\Pi} \sqrt{\Delta f / \Delta \tau},$$

где $\Delta\tau$ — время накопления принимаемого сигнала, Δf — частотное разрешение и k — постоянная Больцмана. Максимальное значение $C/Ш$ достигается при Δf равном ширине спектра эхо-сигнала B . Для сферического объекта $B = 4\pi D \cos \delta / \lambda P$, где δ — угол между осью вращения исследуемого объекта и картинной плоскостью. Таким образом, полагая $\delta = 0^\circ$, оценка $C/Ш$ вычисляется по формуле:

$$C / Ш = \frac{P_{\Pi} G_{\Pi} A_{\Pi} \eta \hat{\sigma} D^{3/2} \sqrt{\lambda \Delta \tau P}}{128 \pi^{3/2} k T_{\Pi} R^4}. \quad (1)$$

Также при проведении и обработке радиолокационных наблюдений необходимо учитывать доплеровское смещение несущей частоты сигнала передатчика f_0 . Частота отраженного от объекта сигнала смещается пропорционально скорости изменения расстояний от центра масс объекта до приемной антенны u и до передающей антенны v на величину, равную f_d :

$$f_d = f_0 \frac{(1+u/c)}{(1-v/c)}.$$

Величина доплеровского смещения несущей частоты может варьироваться от долей единиц до десятков герц в секунду, что также необходимо учитывать при выборе частот настройки и полос каналов системы преобразования и регистрации сигналов на радиотелескопе. Решение о проведении радиолокационных наблюдений принимается исходя из наличия совместных зон видимости исследуемого объекта, полученных оценок величины $C/Ш$ и доплеровского смещения частоты. Затем подготовленные файлы с эфемеридой загружаются в систему управления радиотелескопом.

На рис. 1 точками показано распределение размеров восьми зарегистрированных в ИПА РАН околоземных объектов в зависимости от расстояния до Земли. Пунктирная линия, построенная по формуле (1), показывает значения расстояний до Земли и размеров объектов с периодом вращения $P = 9$ ч, радиолокационным альбедо $\hat{\sigma} = 0.1$ и отношением $C/Ш = 3$ за соответствующее время распространения сигнала. Полученную таким образом кривую можно считать нижней границей чувствительности радиотелескопов РТ-32 и использовать при планировании радиолокационных наблюдений.

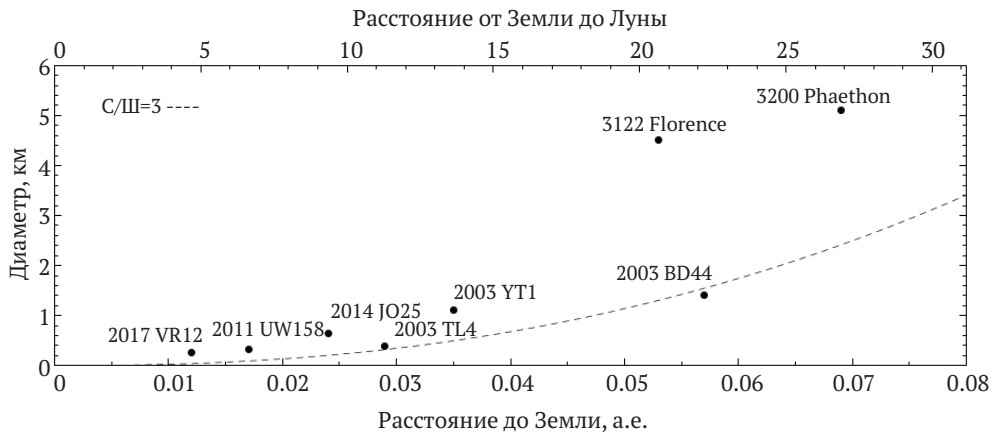


Рис. 1. Околоземные объекты, зарегистрированные на РТ-32

Обработка и анализ наблюдений

Данные наблюдений в цифровом формате и протокольные файлы системы управления радиотелескопа передаются по оптическим линиям связи в вычислительный кластер, где проводятся обработка радиолокационных наблюдений и последующий анализ спектров мощности эхо-сигналов.

Исходя из априорной оценки ширины B спектра эхо-сигнала, задается частотное разрешение спектра Δf таким образом, чтобы выполнялось условие $\Delta f \leq B$. Из файла с данными наблюдений выбирается $\Delta f_{\text{дис}} / \Delta f$ отсчетов, где $f_{\text{дис}}$ — частота дискретизации сигнала. Для каждого i -го отсчета осуществляется компенсация доплеровского смещения частоты $f_{\text{д}i}$ эхо-сигнала путем умножения его амплитуды на $e^{-if_{\text{д}i}t_i}$, где t_i — текущее время. Значение $f_{\text{д}i}$ определяется на каждый момент времени t_i по предварительно вычисленной эфемериде.

Применяя быстрое преобразование Фурье к выбранным отсчетам, можно получить спектр мощности эхо-сигнала на интервале времени $\Delta t = 1/\Delta f$ с частотным разрешением Δf . Далее производится сложение необходимого количества полученных спектров. В случае если регистрация эхо-сигнала проводилась в нескольких частотных каналах, повысить $C/Ш$ можно путем сложения спектров разных каналов с одинаковой поляризацией.

По полученным спектрам мощности эхо-сигнала производится уточнение доплеровского смещения несущей частоты $f_{\text{д}}$, оценивается ширина спектра \hat{B} и отношение $C/Ш$. Значения $f_{\text{д}}$ используются для уточнения элементов орбит исследуемых объектов. В случае продолжительной серии наблюдений ширина спектра мощности $\hat{B}(t)$, как функция от времени, позволяет получить период вращения объекта P . Зная период вращения объекта, можно построить двумерную выпуклую фигуру, представляющую собой проекцию астероида на его экваториальную плоскость [3].

Для характеристики поверхности объекта используется коэффициент круговой поляризации μ , который вычисляется как отношение интегральных сумм левой и правой поляризационных компонент спектра. Чем больше неровность поверхности на масштабах длины волны излучаемого сигнала, тем больше величина μ . Радиолокационное альbedo $\hat{\sigma}$ представляет собой отношение эффективной отражающей поверхности к геометрической поверхности астероида и позволяет судить о свойствах вещества и структуре поверхности. Эта величина оценивается с учетом полученных величин (отношения $C/Ш$, размера и периода вращения объекта).

Заключение

Институт прикладной астрономии РАН регулярно проводит астрономические радиолокационные наблюдения околоземных объектов на радиотелескопах РТ-32 РСДБ-сети «Квазар-КВО». Для планирования таких наблюдений, последующей обработки и анализа эхо-сигнала был создан специальный комплекс программ. Все радиолокационные наблюдения проводятся в автоматическом режиме с использованием эфемеридных данных, вычисляемых программой планирования. С 2015 г. удалось зарегистрировать эхо-сигналы от восьми околоземных объектов. В результате обработки наблюдений были получены спектры мощности эхо-сигналов этих объектов и проведен их анализ.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП/УНУ «Радиоинтерферометрический комплекс «Квазар-КВО».

Литература

1. *Ipatov A., Gayazov I., Smolentsev S., Ivanov D., Ilin G., Shuygina N., Bondarenko Yu.* IVS 2014 General Meeting Proceedings / ed. by D. Behrend, K. D. Baver, and K. L. Armstrong — Science Press, 2014. — P. 173.

2. *Ostro S. J.* Planetary radar astronomy // *Reviews of Modern Physics.* — 1993. — Vol. 65. — P. 1235–1279.

3. *Ипатов А. В., Бондаренко Ю. С., Медведев Ю. Д., Мишина Н. А., Маршалов Д. А., Беннер Л. А.* Радиолокационные наблюдения астероида 2011 UW158 // *Письма в Астрон. журн.* — 2016. — Т. 42, № 12. — С. 935.

Scheduling and Processing Radar Observations in the IAA RAS

Yu. S. Bondarenko, D. A. Marshalov

The Institute of Applied Astronomy of the Russian Academy of Sciences (IAA RAS) observes near-Earth objects (NEO) regularly using the 32-m radio telescopes (RT-32) of its “Quasar” VLBI network. The signals are transmitted by the planetary locators of the Goldstone Deep Space Communications Complex (USA) and the National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences (China). Special software has been developed to schedule such radar observations and to process the echo signal data. The radar observations are scheduled following the purposes to determine windows for joint observations, to calculate the Doppler frequency shift of the signal recorded and the signal-to-noise ratio for a given configuration of the transmitting and receiving antenna systems and the NEO selected. The radar observations are analysed taking into account the protocol files of the radio telescope control system and the ephemeris calculated. The result of this process is the continuous wave echo power spectra that were obtained and analysed. As a result, the continuous wave echo power spectra of the recorded echo signals were obtained and their analysis was carried out.

Keywords: Near-Earth objects, asteroids, radar observations, echo power spectra analysis.