

Наблюдения лунного модуля Chang'E-3 на радиотелескопах РТ-32

© Д. А. Маршалов¹, Ю. С. Бондаренко¹, М. В. Васильев¹,
Э. И. Ягудина¹, М. Б. Зотов¹, А. Г. Михайлов¹,
Цзинсун Пин², Винсао Ли²

¹ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

²Национальные астрономические обсерватории
Китайской академии наук, г. Пекин, Китай

В работе представлены результаты обработки сигнала транспондера посадочного аппарата Chang'E-3 (CE-3), принятого радиотелескопами РТ-32 комплекса «Квазар-КВО». Рассмотрены особенности планирования наблюдений и обработки данных CE-3 в ИПА РАН на специально разработанном программном комплексе.

Получены высокоточные фазовые радиолокационные измерения посадочного модуля CE-3 с инструментальной ошибкой 1–2 мм на секундном интервале накопления. Отклонение остаточных невязок, вычисленных с использованием лунных эфемерид ИПА РАН, не превосходят ± 2 см.

Ключевые слова: радиолокация, радиотелескоп, фазовые измерения, космический аппарат Chang'E-3, эфемерида Луны.

[https:// 10.32876/AplAstron.47.79-84](https://10.32876/AplAstron.47.79-84)

Радиолокация лунного посадочного аппарата

В декабре 2013 г. на поверхность Луны совершил посадку китайский космический аппарат Chang'E-3 [1]. Помимо прочего оборудования, посадочный аппарат (ПА) был оснащен приемопередающим устройством (транспондером), работающим в X диапазоне частот. Транспондер предназначен для приема высокостабильного сигнала на частоте 7.2 ГГц и его когерентного переизлучения на частоте 8470 МГц. Размещение транспондера на Луне позволило реализовать метод радиолокации Луны LRR (**Lunar Radio Ranging**) [2]. Этот метод по сравнению с методом лазерной локации Луны LLR (**Lunar Laser Ranging**) имеет ряд преимуществ: независимость от погодных условий; независимость от фаз Луны; пониженные требования к сопровождению цели; возможность одновременного наблюдения переизлученного сигнала ПА несколькими станциями; значительно большее число наблюдательных пунктов, которые могут регистрировать сигнал.

При проведении LRR-наблюдений для передачи сигнала на борт ПА используются 66- и 35-метровый локаторы китайских станций дальней космической связи Jiamusi и Kashi [3]. Переизлученный транспондером сигнал регистрируется обсерваториями Seshan, Kunming и Urumqi, входящими в состав Национальных астрономических обсерваторий Китайской академии наук (НАОК).

С 2017 г. Институт прикладной астрономии Российской академии наук (ИПА РАН) совместно с НАОК участвует в LRR-наблюдениях. Для приема и регистрации сигнала SE-3 в ИПА РАН используются радиотелескопы РТ-32 в обсерваториях «Светлое», «Зеленчукская» и «Бадары» [4].

Проведение и обработка наблюдений

При планировании наблюдений на радиотелескопах РТ-32 комплекса «Квazar-КВО» производится расчет окон видимости с использованием программного пакета планирования радиолокационных наблюдений ECHO-2 [5]. В результате формируются эфемеридные файлы, которые используются системой управления радиотелескопа. Наблюдения выполняются в автоматическом режиме по составленному расписанию с использованием штатной аппаратуры в X диапазоне частот. Данные записываются системой регистрации Mark5B+ с двухбитовым квантованием. Затем по цифровым каналам связи записанные данные поступают на обработку.

Обработка наблюдений делится на два этапа. На первом этапе обработки вычисляются интегральная фаза зарегистрированного сигнала φ_i и ее производные параметры — доплеровская скорость Vel_i и изменение расстояния $\Delta\rho_i$ на каждый заданный момент времени. На втором этапе уточняются селеноцентрические координаты ПА и фазовые неоднозначности, определяются поправки к шкалам времени наблюдательных станций, тропосферная и ионосферная задержки.

Для вычисления интегральной фазы зарегистрированного сигнала используется цифровая петля фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) [6]. В петле ФАПЧ производится определение текущего мгновенного значения фазы $\tilde{\varphi}_i$ сигнала на нулевой частоте (рис. 1). Для этого i -е значение входного сигнала домножается на текущее значение цифрового генератора сигнала (φ_{NCO}). Затем вычисляются значение фазы на текущий момент времени $\hat{\varphi}_i$, ее предсказание для следующего шага ФАПЧ ($\hat{\varphi}_{i+1}$). После чего эти величины используются для вычисления следующего значения φ_{NCO} цифрового генератора сигнала. Алгоритм слежения за фазой сигнала реализован в пакете обработки и анализа радиоастрономических наблюдений СПЕКТР-1 [5].

В работе [7] на основе численного моделирования было показано, что использование радиолокационных и радиоинтерферометрических наблюдений ПА на Луне может привести к заметному уточнению параметров теории орбитально-вращательного движения Луны. Целью дальнейшей обработки полученных наблюдений было подтверждение их точностных характеристик и составление предварительного списка уточняемых параметров, который позволил бы реализовать потенциальную точность LRR-измерений.

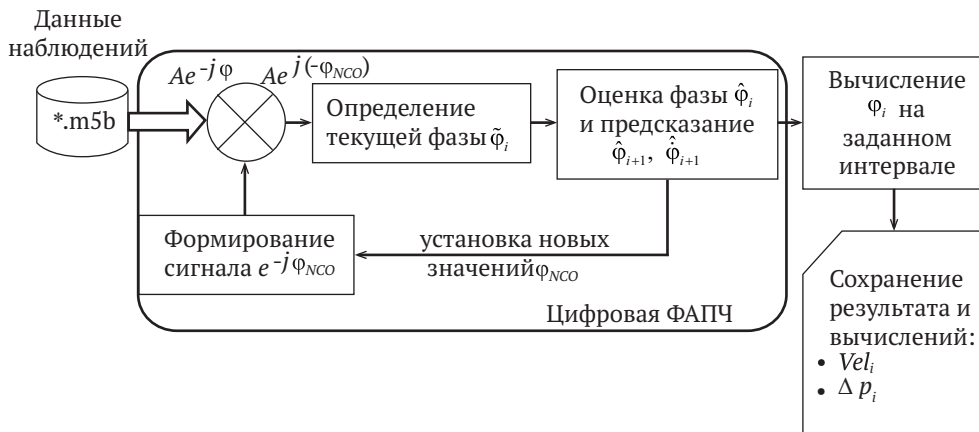


Рис. 1. Структурная схема алгоритма вычисления фазы сигнала ПА

Результаты обработки наблюдений

За период с декабря 2017 г. по июнь 2018 г. были успешно проведены шесть сеансов наблюдений СЕ-3. В табл. 1 представлены даты наблюдений, конфигурации приемо-передающих станций и инструментальная точность, полученная по каждому сеансу наблюдений, выраженная в среднеквадратических отклонениях (СКО) интегральной фазы в мм.

Таблица 1

Сеансы наблюдений СЕ-3 в 2017/2018

Дата проведения	Сеанс	Станции	СКО фазы, мм
7 декабря 2017	ru0744	Kashi-Светлое	1.17
10 декабря 2017	ru0745	Kashi- Светлое	1.28
31 марта 2018	ru0755	Jiamusi-Бадары	2.01
2 апреля 2018	ru0756	Jiamusi- Бадары	2.95
25 июня 2018	ru0758	Kashi- Бадары	1.72
27 июня 2018	ru0759	Kashi- Бадары	2.13

Остаточные невязки LRR-наблюдений, полученные с использованием эфемерид EPM-2014 [8] и программного комплекса ЭРА [9], для конфигурации Kashi-СЕ-3-«Бадары» представлены на рис. 2. При обработке этих наблюдений уточнены селеноцентрические координаты ПА, фазовая неоднозначность измерений, тропосферная задержка и поправки к шкалам времени станций. Отклонение остаточных невязок не превосходит ± 2.5 см.

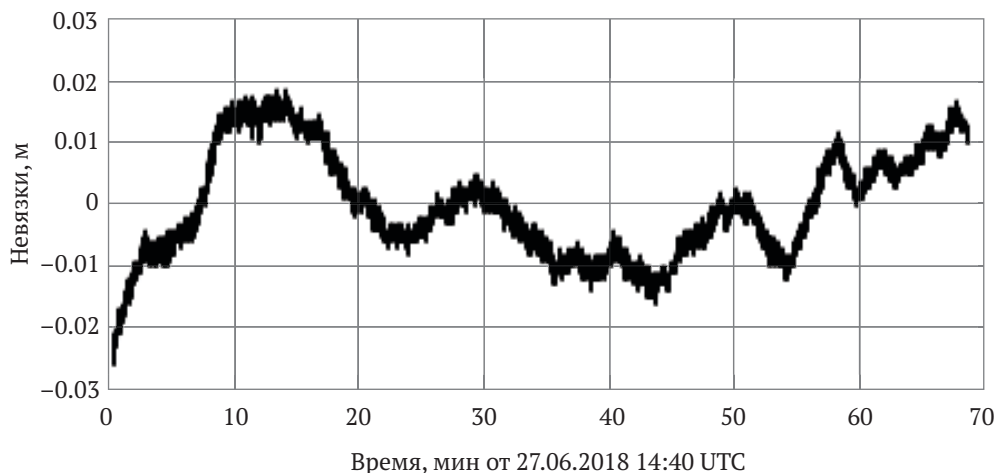


Рис. 2. Невязки LRR-наблюдений (Kashi-CE-3-Badary)

В распоряжение авторов китайскими коллегами были предоставлены некоторые данные наблюдений CE-3 в 2014 г. на следующих временных интервалах (шкала UTC):

1. 13.11.2014 23:42:00 – 14.11.2014 01:41:29;
2. 03.12.2014 10:48:00 – 03.12.2014 14:16:19;
3. 04.12.2014 09:47:01 – 04.12.2014 13:14:19;
4. 05.12.2014 12:22:00 – 05.12.2014 15:45:19.

Измерения проводились станцией Kashi. Данные приведены с интервалом 1 сек. На рис. 3 показаны результаты обработки этих данных, причем каждому интервалу соответствует своя кривая. Уточнялись следующие параметры: селеноцентрические координаты ПА, фазовые неоднозначности LRR-наблюдений и тропосферные задержки на каждом из интервалов. Отклонение остаточных невязок не превосходит ± 11 см.

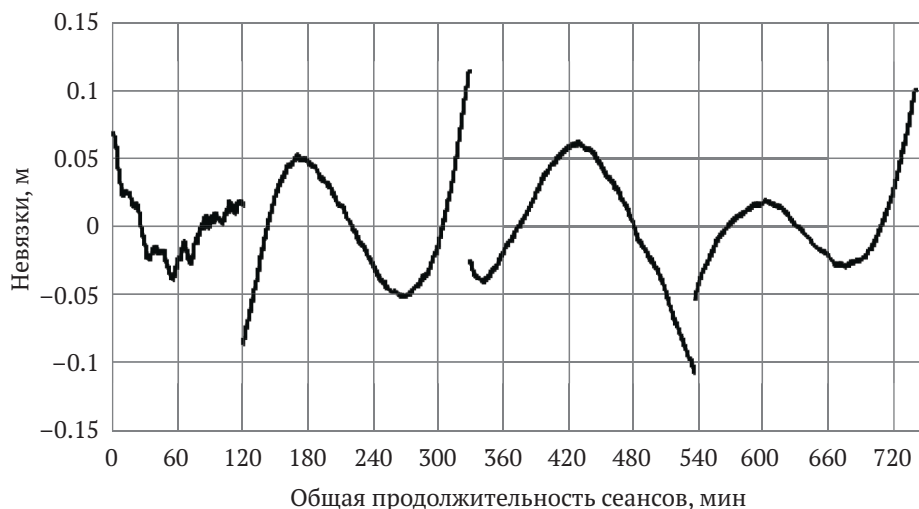


Рис. 3. Невязки LRR-наблюдений (Kashi-CE-3- Kashi)

Поведение остаточных невязок LRR-наблюдений на двухчасовых и более длинных интервалах непрерывных фазовых измерений по сравнению с более короткими интервалами (рис. 2 и первый интервал на рис. 3) демонстрирует необходимость применения более сложных моделей тропосферы и ионосферы для достижения сантиметрового и субсантиметрового уровней модельных вычислений. С этой целью может быть использована полиномиальная аппроксимация тропосферной задержки в зените или еще более предпочтительный вариант стохастического моделирования с использованием фильтра Калмана.

Проведение такой работы осложняется сильными корреляционными связями между параметрами используемой модели при обработке имеющихся у нас в настоящее время LRR-наблюдений. Применение более длинных (год и более) рядов LRR-наблюдений должно существенно уменьшить корреляционные связи, дать возможность достичь сантиметрового уровня представления наблюдений, что позволит перейти к уточнению параметров орбитально-вращательного движения Луны. В дальнейшем предполагается уточнение эфемериды Луны на базе многолетних, в период 2014–2018 гг., LRR-наблюдений.

Выводы

СКО фазовых LRR-наблюдений составило 1–3 мм при темпе выдачи измерений, равном 1 сек. Остаточные невязки LRR-наблюдений с участием станций Kashi и «Бадары» не превосходят ± 2.5 см. Остаточные невязки всех обработанных LRR-наблюдений не превосходят ± 11 см и могут быть доведены до сантиметрового уровня за счет улучшения параметрической модели тропосферной и ионосферной задержек.

Полученные результаты демонстрируют принципиальную возможность оценивания короткопериодических вариаций орбитально-вращательного движения Луны и других селенодинамических параметров по LRR-наблюдениям. Среди дополнительных применений данного типа измерений могут быть рассмотрены сличения частот удаленных стандартов времени и определение поправок к Всемирному времени.

Л и т е р а т у р а

1. Li C., Liu J., Ren X. et al. The Chang'e 3 Mission Overview // Space Science Reviews. — 2015. — Vol. 190, no. 1–4. — P. 85–101.

2. Ping J., Meng Q., Wang M. et al. First 3-Way Lunar Radio Phase Ranging and Doppler Experiment in Chang'E-3 Lander Mission // European Planetary Science Congress 2014: EPSC Abstracts. — 2014. — Vol. 9, EPSC2014-226-1.

3. Xu D., Dong G., Wang G. et al. First geodetic VLBI sessions with the Chinese Deep Space Stations Jiamusi and Kashi // Advances in Space Research. — 2016. — Vol. 58, no. 9. — P. 1638–1647.

4. Ivanov D. V., Uratsuka M.-R., Ipatov A. V. et al. Russian-Cuban Colocation Station for Radio Astronomical Observation and Monitoring of Near-Earth Space // Astrophysical Bulletin. — 2018. — Vol. 73, no. 2 — P. 257–266.

5. Бондаренко Ю. С., Маршалов Д. А. Планирование и обработка радиолокационных наблюдений в Институте прикладной астрономии РАН // Труды ИПА РАН. — СПб.: ИПА РАН, 2018. — Вып. 47. — С. 3–7.

6. Meegyeong Paik, Sami W. Asmar Detecting High Dynamics Signal from Open-Loop Radio Science Investigation // Proceedings of the IEEE. — 2011. — Vol. 99, no. 5. — P. 881–881.

7. Васильев М. В., Шуйгина Н. В., Ягудина Э. И. Использование радиотехнических наблюдений посадочных аппаратов для уточнения эфемериды Луны // Труды Всероссийской астрометрической конференции «Пулково-2015». — 2016. — № 223. — С. 163–168.

8. Vasilyev M. V., Yagudina E. I. Russian lunar ephemeris EPM-ERA 2012 // Solar System Research. — 2014. — P. 158–165.

9. Красинский Г. А., Васильев М. В. Универсальная система программирования для эфемеридной и динамической астрономии // Труды ИПА РАН. — СПб.: ИПА РАН, 1997. — Вып. 1. — С. 158–165.

Observations of the Lunar Module Chang'E-3 Using RT-32 Radio Telescopes

D. A. Marshalov, Yu. S. Bondarenko, M. V. Vasilyev, E. I. Yagudina,
M. B. Zotov, A. G. Mikhailov, Jinsong Ping, Wenxiao Li

The paper presents the results of processing the transponder signal of the Chang'E-3 (CE-3) spacecraft received by the RT-32 radio telescopes of the "Quasar" VLBI network. The features of observations scheduling and data processing of CE-3 signal are considered.

The high-precision phase radar measurements of the CE-3 landing module were obtained with an instrumental error of 1–2 mm. The deviation of residuals in model calculations does not exceed ± 2 cm.

Keywords: radio ranging, radio telescope, phase measurement, Chang'E-3 lunar module, lunar ephemeris.