

Предварительные результаты обработки фазовых радиолокационных наблюдений лунных посадочных аппаратов

**© М. В. Васильев, Э. И. Ягудина, В. С. Шарков,
Ю. С. Бондаренко, Д. А. Маршалов**

ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

Измерение фазовых радиолокационных дальностей до лунных посадочных аппаратов (ЛПА) может стать дополнением или даже заменой традиционных светолокационных наблюдений уголкового отражателя, установленных на поверхности Луны.

В статье приведены предварительные результаты работ по первичной и вторичной обработке фазовых радиолокационных наблюдений (ФРН) ЛПА Chang'E-3 (CE-3). Наблюдения проводились с участием китайских радиотелескопов «Kashi», «Jiamusi» и РСДБ-комплекса «Квазар-КВО». Разработаны методики учета влияния атмосферы и уточнения величин фазовых неоднозначностей при вторичной обработке ФРН-наблюдений. По результатам вторичной обработки показано, что точности полученных ФРН-наблюдений соответствуют заявленным. Уточнены селеноцентрические координаты ЛПА CE-3.

Ключевые слова: радиолокация Луны, селеноцентрические координаты, лунный посадочный аппарат, эфемериды Луны, тропосферная задержка, фазовые измерения.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.49.3-8>

Введение

В работах [1, 2] методами математического моделирования было показано, что использование ФРН-наблюдений ЛПА позволит заметно уточнить эфемериды Луны. Радиолокационные наблюдения ЛПА CE-3 проводятся уже более 4 лет [3, 4]. В работе [5] приведены результаты планирования, проведения первичной и вторичной обработок наблюдений ЛПА CE-3 с применением китайских радиотелескопов «Kashi», «Jiamusi» и РСДБ-комплекса «Квазар-КВО» на отдельных интервалах 2014 и 2018 гг. В силу того, что в распоряжении авторов имеется совсем небольшой ряд наблюдений, в данной работе решались только следующие задачи:

- проверка заявленных точностных характеристик фазовых радиолокационных наблюдений ЛПА;
- разработка методики учета влияния атмосферы при вторичной обработке наблюдений;
- уточнение селеноцентрических координат ЛПА.

Наблюдения ЛПА Chang'E-3

По сравнению с методом лазерной локации методы РСДБ и радиолокационные измерения посадочных аппаратов на Луне имеют важные преимущества: это очень плотные ряды наблюдений с высоким временным разрешением, которые не зависят от фаз Луны и погодных условий; такие наблюдения могут проводиться при использовании большого количества станций одновременно. Наблюдения ЛПА CE-3, положение которого на поверхности Луны показано на рис. 1, проводятся уже более 4 лет.

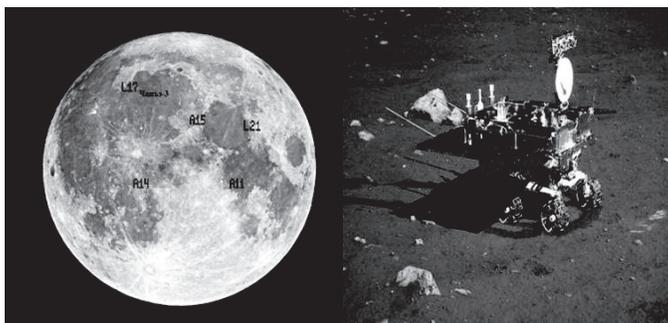


Рис. 1. Посадочный аппарат Chang'E-3 и его местоположение на поверхности Луны

ЛПА этого проекта оснащен приемопередающим устройством (транспондером), работающем в X-диапазоне частот и предназначенным для приема высокостабильного сигнала на частоте 7.2 ГГц и его когерентного переизлучения на частоте 8470 МГц. При проведении ФРН-наблюдений для передачи сигнала на борт ЛПА используются 66- и 35-метровые локаторы. Переизлученный транспондером сигнал регистрируется обсерваториями «Seshan», «Kunming», «Jiamusi», «Kashi» и «Urumqi», входящими в состав NAOC (National Astronomical Observatories of China, Китайская академия наук). С 2017 г. ИПА РАН начал участвовать в ФРН-наблюдениях китайского посадочного аппарата вместе с NAOC. Для приема и регистрации сигнала CE-3 используются радиотелескопы РТ-32 в обсерваториях «Светлое», «Зеленчукская» и «Бадары». В работе [5] представлены этапы проведения наблюдений и первичной обработки сигнала ЛПА и первая попытка обработки ФРН-наблюдений CE-3.

В таблице представлены наблюдения ЛПА CE-3 за период 2014–2018 гг., имеющиеся в нашем распоряжении на данный момент. Наблюдения, представленные в таблице, относятся к разным датам и разным станциям, имеют продолжительность от 20 мин до 3 ч. Промежуток между соседними наблюдениями для всех интервалов составлял 1 с.

Интервалы наблюдений ЛПА СЕ-3 за период 2014–2018 гг.

Станции	Интервалы наблюдений	
	Год-месяц-число	часы:минуты:секунды
«Jiamusi»	2014-11-13	23:42:00 – 2014-11-14 01:41:49
«Jiamusi»	2014-12-03	10:48:00 – 2014-12-03 14:16:19
«Jiamusi»	2014-12-04	09:47:00 – 2014-12-04 13:15:19
«Jiamusi»	2014-12-05	12:22:00 – 2014-12-05 15:45:19
«Jiamusi»	2014-12-06	11:31:00 – 2014-12-06 15:01:49
«Jiamusi»	2014-12-07	12:31:00 – 2014-12-07 15:50:59
«Jiamusi»	2014-12-08	13:34:00 – 2014-12-08 16:47:19
«Jiamusi»	2014-12-09	14:21:00 – 2014-12-09 17:36:49
«Jiamusi»	2014-12-10	15:02:00 – 2014-12-10 18:02:59
«Kashi» – «Svetloe»	2017-12-07	00:30:02 – 2017-12-07 00:59:38
«Kashi» – «Svetloe»	2017-12-07	01:00:02 – 2017-12-07 01:20:59
«Kashi» – «Svetloe»	2018-06-27	14:41:02 – 2018-06-27 15:50:00

Модель наблюдений

Для вычисления модельных значений ФРН-наблюдений использовались программный комплекс ЭРА [6] и эфемерида Луны ЕРМ-2014 [7]. Для каждого интервала наблюдений оценивались фазовая неоднозначность и поправки к априорным значениям координат ЛПА СЕ-3. Для компенсации задержек распространения сигнала в атмосфере каждые 20 мин находилась также поправка к влажной тропосферной задержке в зените, а также скорость ее изменения. Основная часть тропосферной и ионосферной задержек компенсировалась по данным IGS [8, 9]. Среднеквадратическая ошибка (СКО) ФРН-наблюдений принималась равной 2.5 мм, что в среднем соответствует СКО, получаемым в ходе первичной обработки.

Результаты обработки наблюдений

По результатам уточнения перечисленных выше параметров были получены остаточные невязки ФРН-наблюдений ЛПА СЕ-3 на станции «Jiamusi», которые соответствуют ожидаемым значениям. По итогам обработки СКО ФРН-наблюдений была уточнена и составила 1.6 мм. Ниже приведены графики остаточных невязок ФРН-наблюдений в реальном масштабе времени (рис. 2) и график тех же невязок в зависимости от их номеров (рис. 3).

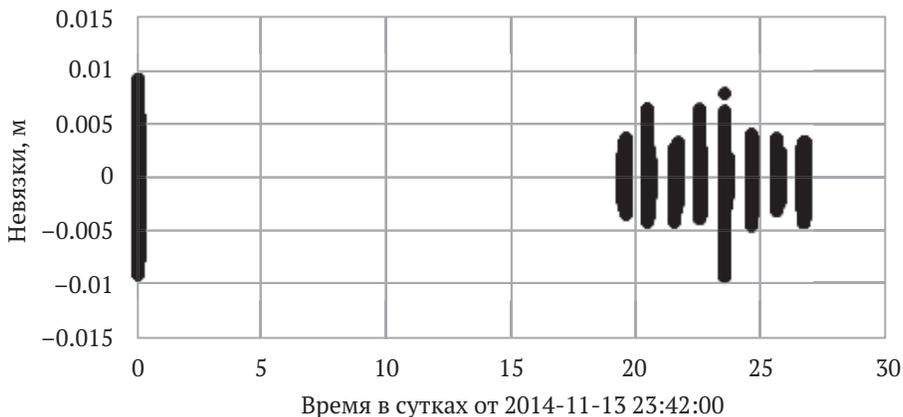


Рис. 2. Остаточные невязки ФРН-наблюдений в реальном масштабе времени

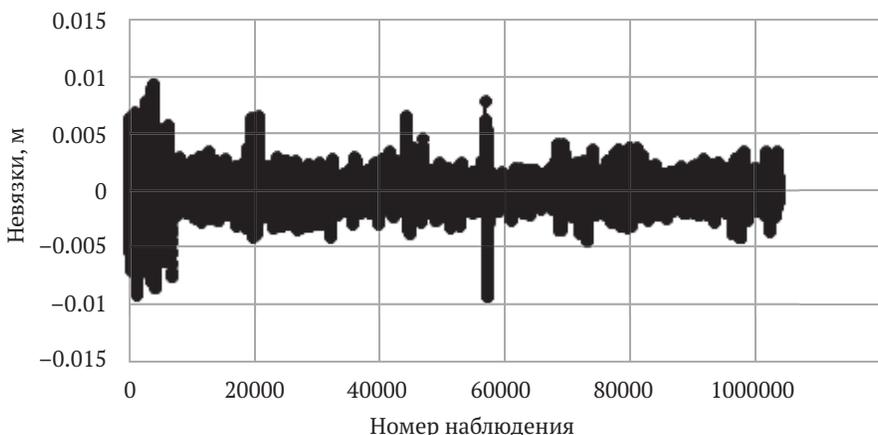


Рис. 3. Остаточные невязки ФРН-наблюдений в зависимости от их номеров

Были получены также оценки селеноцентрических цилиндрических координат ЛПА СЕ-3, формальные СКО которых составили $0.5''$, 7.4 м, 3.2 м в долготе, экваториальной и полярной проекциях — PX и PY — соответственно. Принимая во внимание, что общая продолжительность обработанных ФРН-наблюдений составила чуть более суток, погрешности определения координат посадочного аппарата следует признать вполне приемлемыми.

Заключение

В результате анализа остаточных невязок ФРН-наблюдений подтверждена высокая, на уровне нескольких мм, точность проведенных измерений. Получена также предварительная оценка точности селеноцентрических координат ЛПА на основе ее совместного определения с параметрами моделей тропосферной и ионосферной задержек, а также величин фазовых неоднородностей. Обработка месячного ряда ФРН-наблюдений еще раз показала

необходимость и целесообразность использования многолетних данных наблюдений CE-3 для уточнения лунных эфемерид и изучения короткопериодических вариаций селенодинамических параметров.

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

Л и т е р а т у р а

1. Васильев М. В., Шуйгина Н. В., Ягудина Э. И. Использование радиотехнических наблюдений посадочных аппаратов для уточнения эфемериды Луны // Известия ГАО в Пулково: Труды Всероссийской астрономической конференции «Пулково — 2015». — 2016. — Вып. 223. — С. 163–168.

2. Vasilyev M. V., Shuygina N. V., Yagudina E. I. Expected impact of the Lunar Lander VLBI observations on the Lunar Ephemeris Accuracy // Transactions of IAA RAS. — St. Petersburg: IAA RAS, 2017. — Vol. 40. — P. 16–21.

3. Qionghui Liu et al. Monitoring motion and measuring relative position of the Chang'E-3 rover // Radio Science. — 2014. — Vol. 49, no. 11. — P. 80–86.

4. D. Xi et al. First geodetic VLBI sessions with the Chinese Deep Space Stations Jiamusi and Kashi // Advances in Space Research. — 2016. — Vol. 58. — P. 1638–1647.

5. Маршалов Д. А., Бондаренко Ю. С., Васильев М. В., Ягудина Э. И., Зотов М. Б., Михайлов А. Г., Цинсонг Пин, Винхао Ли. Наблюдения лунного модуля Chang'E-3 на радиотелескопах РТ-32 // Труды ИПА РАН. — СПб.: ИПА РАН, 2018. — Вып. 47. — С. 79–84.

6. Krasinsky G., Vasilyev M. ERA-7. Knowledge Base and Programming System for Dynamical Astronomy: Manual. — IAA RAS, 2007. — 245 p.

7. Vasilyev M. V., Yagudina E. I. Russian lunar ephemeris EPM ERA 2012 // Solar Syst. Res. — 2014. — Vol. 48, no. 2. — P. 158–165.

8. Boehm J., Werl D., Schuh H. Troposphere mapping functions for GPS and very long baseline interferometry from European Centre for Medium-Range Weather Forecasts operational analysis data // J. Geophys. Res. — 2006. — Vol. 111, no. B2. — B02406. — doi:10.1029/2005JB003629.

9. IERS Conventions (2010). IERS Technical Note No. 36. / ed by Petit G., Luzum B. — Frankfurt am Main: Bureau International des Poids et Mesures, US Naval Observatory, 2010. — 179 p.

Preliminary Results from the Lunar Lander's Radio Ranging Phase Observations Processed and Analysed

M. V. Vasilyev, E. I. Yagudina, V. S. Sharkov,
Yu. S. Bondarenko, D. A. Marshalov

Lunar phase radio ranging can be an addition to or even a replacement for the traditional LLR (Lunar Laser Ranging) observations. We present our preliminary data received as a result of the Chang'E-3 lander's phase radio ranging observations processed and analysed.

The observations were carried out using the Chinese radio telescopes “Kashi”, “Jiamusi” and Russian “Quasar” VLBI network. We propose several methods to take into account the atmospheric delay and to calculate the values of phase ambiguities.

Our measurement post-processing show that the observation accuracy obtained correspond to the previously stated ones. The RMS corrections to the selenocentric coordinates of the Chang'E-3 lander are included in this paper as well.

Keywords: phase radio ranging, selenocentric coordinates, Lunar lander, ephemeris of the Moon, tropospheric delay, phase measurements.