

## Определение местоположения передающей антенны на Земле по наблюдениям ее сигналов, отраженных от Луны

© Ю. С. Бондаренко<sup>1</sup>, Д. А. Маршалов<sup>1</sup>, **А. В. Маклаков**<sup>1</sup>, Ц. Сан<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>Национальные астрономические обсерватории Китайской академии наук, г. Пекин, КНР

### Реферат

Сигналы наземных средств связи, излучаемые в сторону Луны, частично отражаются от ее поверхности и могут быть зарегистрированы радиотелескопами РСДБ-комплекса «Квазар-КВО». В некоторых случаях при обнаружении таких эхо-сигналов может возникнуть вопрос об их принадлежности и характеристиках, и эта задача имеет самостоятельное прикладное значение. В данной работе, на примере реальных наблюдений отраженных от Луны радиосигналов, решается задача определения местоположения заранее неизвестной передающей антенны, расположенной на Земле.

**Ключевые слова:** радиолокация, Луна, эхо-сигнал, фазовые измерения, космический аппарат Chang'E-3.

*Контакты для связи:* Бондаренко Юрий Сергеевич ([bondarenko@iaaras.ru](mailto:bondarenko@iaaras.ru)).

*Статья поступила в редакцию 25.11.2019, принята к публикации 20.03.2020, опубликована 12.05.2020.*

**Для цитирования:** Бондаренко Ю. С., Маршалов Д. А., Маклаков А. В., Сан Ц. Определение координат излучателя по наблюдениям отраженного от поверхности Луны радиосигнала // Труды ИПА РАН. 2020. Вып. 52. С. 13–16.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.52.13-16>

## Search for the Transmitting Antenna on Earth by Observing its Signals Reflected from the Moon

Yu. S. Bondarenko<sup>1</sup>, D. A. Marshalov<sup>1</sup>, **A. Maklakov**<sup>1</sup>, J. Sun<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Applied Astronomy of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, Russia

<sup>2</sup>National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China

### Abstract

Currently, the number of space programs designed to explore the Moon is constantly growing. As a result, the number of artificial radio signals directed towards the Earth is increasing. These can be both signals emitted by lunar orbiting or landing vehicles, and signals from ground-based communications reflected directly from the lunar surface. The task of recording and analyzing such signals is subject to application. So, in 1978 the coordinates of the transmitters installed and operating on the Moon within the ALSEP program were determined from the signal registered by the RATAN-600 radio telescope. Since 2017, the Institute of Applied Astronomy of the Russian Academy of Sciences has regularly conducted observations of the transponder radio signal installed on the Chang'E-3 lunar lander. The transponder is designed to receive a highly stable signal at a frequency of 7.2 GHz and its coherent reradiation at a frequency of 8.47 GHz. Transmitting antennas of the Chinese deep space communication stations are used to transmit the signal to the Chang'E-3 lunar lander. Then, the signal reradiated by the transponder is recorded by RT-32 radio telescopes at the Svetloe, Zelenchukskaya and Badary observatories. As a result, based on the obtained series of phase observations, the coordinates of the Chang'E-3 lander on the Moon are refined.

Signals of ground-based communications emitted towards the Moon are partially reflected from its surface and can also be recorded by radio telescopes of the “Quasar” VLBI network. In case such echoes are detected, the question of their affiliation and characteristics may arise. In this paper, we determine the location of a transmitting antenna on Earth by observing its signals reflected from the Moon.

**Keywords:** ranging, the Moon, echo, phase measurements, Chang'E-3 spacecraft.

*Contacts:* Yuri S. Bondarenko ([bondarenko@iaaras.ru](mailto:bondarenko@iaaras.ru)).

*Received December, 25, 2019, accepted March 20, 2019, published May 12, 2020.*

**For citation:** Bondarenko Yu. S., Marshalov D. A., Maklakov A. V., Sun J. Search for the transmitting antenna on Earth by observing its signals reflected from the Moon // Transactions of IAA RAS. 2020. Vol. 52. P. 13–16.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.52.13-16>

## Введение

В настоящее время количество космических программ, направленных на исследование Луны, постоянно растет. Одно из следствий этих исследований – увеличение числа искусственных радиосигналов, направленных в сторону Земли. Это могут быть как собственные сигналы, излучаемые лунными орбитальными или посадочными аппаратами, так и сигналы наземных средств связи, отраженные непосредственно от лунной поверхности. Задача регистрации и анализа таких сигналов имеет прикладной характер. Так, в 1978 г. на радиотелескопе РАТАН-600 по наблюдаемому сигналу были определены координаты излучателей, установленных и работающих на Луне в рамках программы ALSEP [1]. С 2017 г. в ИПА РАН регулярно проводятся наблюдения радиосигнала приемопередающего устройства (транспондера), установленного на лунном посадочном аппарате Chang'E-3 [2]. Транспондер принимает высокостабильный сигнал на частоте 7.2 ГГц и когерентно переизлучает его на частоте 8.47 ГГц. Для передачи сигнала на борт аппарата используются антенны китайских станций дальней космической связи. Переизлученный транспондером сигнал регистрируется радиотелескопами РТ-32 в обсерваториях «Светлое», «Зеленчукская» и «Бадарь» [3]. В результате, по полученным рядам фазовых наблюдений уточняются координаты посадочного аппарата Chang'E-3 на Луне [4].

Сигналы наземных средств связи, излучаемые в сторону Луны, частично отражаются от ее поверхности и также могут быть зарегистрированы радиотелескопами РСДБ комплекса «Квазар-КВО» [5]. В некоторых случаях, при обнаружении таких эхо-сигналов может возникнуть вопрос об их характеристиках и принадлежности. В данной работе решается задача определения местоположения передающей антенны, расположенной на Земле, по наблюдениям ее сигналов, отраженных от Луны.

## Наблюдения и обработка эхо-сигнала

21 марта 2019 г. радиотелескопом РТ-13 обсерватории «Бадарь» был зарегистрирован отраженный от поверхности Луны радиосигнал заранее неизвестной передающей антенны одной из станций дальней космической связи КНР в X-диапазоне частот. Передача сигнала на лунный посадочный аппарат Chang'E-3 осуществлялась на частоте 7.2 ГГц, а время проведения сеанса связи с 14:40 по 16:00 UT было заранее согласовано с Национальными астрономическими обсерваториями Китайской академии наук. При этом искусственный сигнал, сформированный транспондером на частоте 8.47 ГГц, находился вне ра-

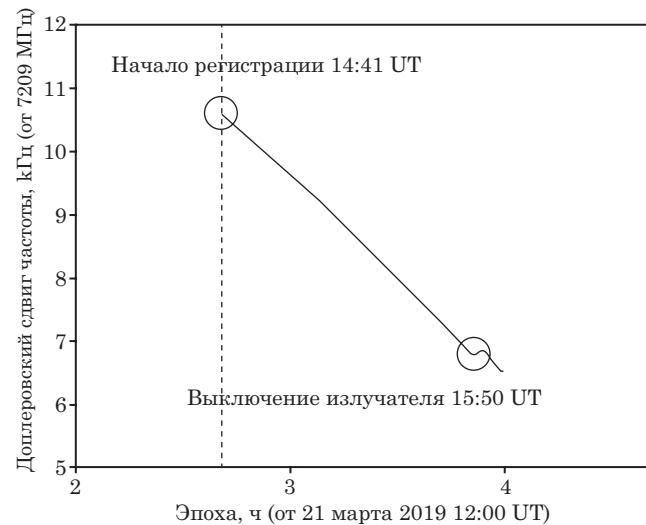


Рис. 1а. Изменение частоты отраженного от Луны эхо-сигнала со временем

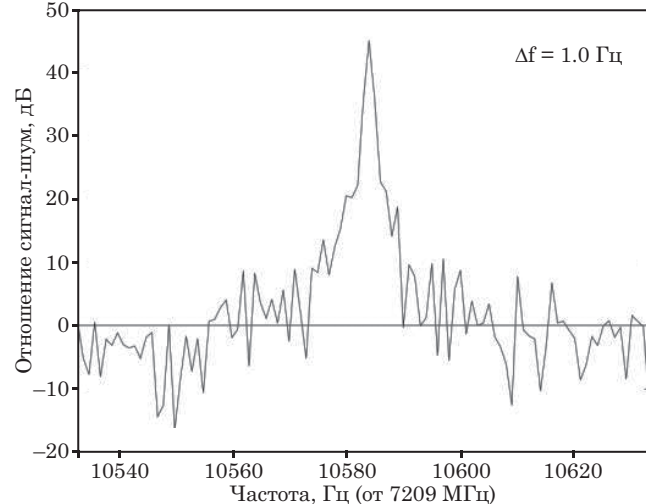


Рис. 1б. Спектр мощности на момент начала регистрации

бочего диапазона приемника РТ-13 и не мог быть им зарегистрирован.

С помощью разработанного в ИПА РАН комплекса программ по обработке и анализу астрономических радиолокационных наблюдений [6] были получены высокоточные доплеровские измерения зарегистрированного эхо-сигнала. Ошибка определения фазы эхо-сигнала составила 2.13 мм по расстоянию или 7.10 пс по задержке. Изменение частоты со временем и спектр мощности эхо-сигнала на момент начала регистрации представлены на рис. 1а и б соответственно.

Как видно из рис. 1, эхо-сигнал появился 21 марта 2019 г. в 14:41 UT и регистрировался вплоть до исчезновения в 15:50 UT, а его частота изменялась в пределах 4 кГц. Отношение сигнал-шум на 14:41 UT составило 45 дБ.

## Поиск передающей антенны

Высокоточные доплеровские наблюдения позволяют определить положение передающей

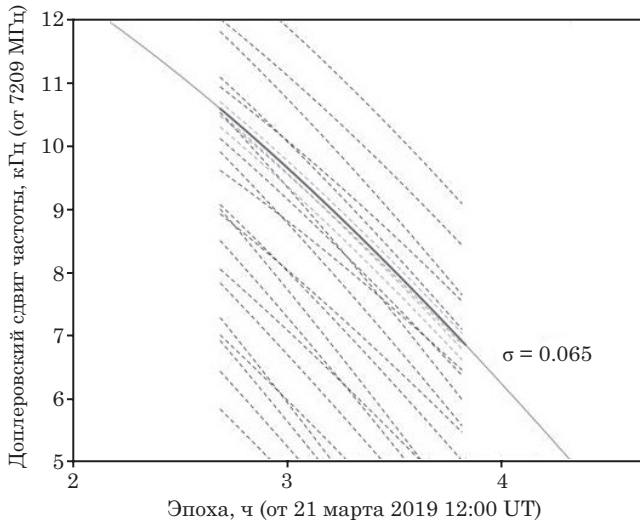


Рис. 2а. Измеренная и вычисленные (сплошная и пунктирные линии) частоты эхо-сигнала, отраженного от Луны

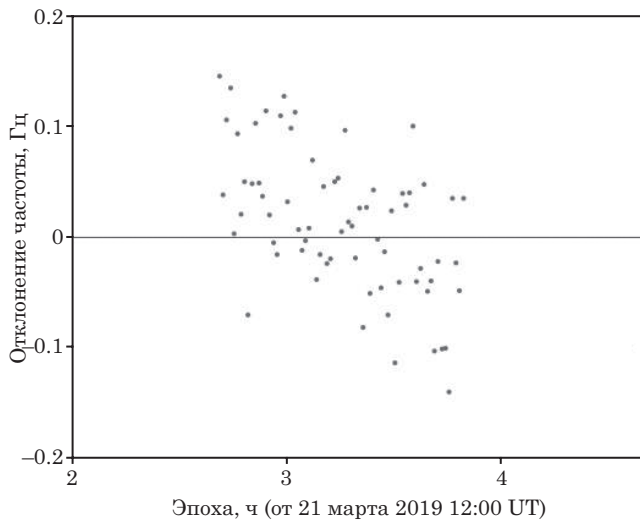


Рис. 2б. Отклонения измеренной частоты от найденного решения

антенны на Земле и частоту передаваемого сигнала путем минимизации отклонений измеренной частоты эхо-сигнала от частоты, вычисленной по заданной радиолокационной модели. Радиолокационная модель была построена на основе численной теории движения планет и Луны DE430. При этом учитывались поправки к параметрам вращения Земли (координаты полюса, прецессия, нутация и Всемирное время) и поправки за световой промежуток, абберацию и релятивистское отклонение света. Известным также считалось положение принимающего сигнал радиотелескопа РТ-13 на Земле с координатами  $51.77026^\circ$  N;  $102.23392^\circ$  E; 822 м, и положение посадочного аппарата Chang'E-3 на Луне с координатами  $44.12257^\circ$  N;  $19.51183^\circ$  W;  $-2639.5$  м, которое играло в модели роль «подрадарной» точки. Реализация этой модели позволила вычислять ожидаемую частоту эхо-сигнала для радиотелескопа РТ-13 в зависимости от положения переда-

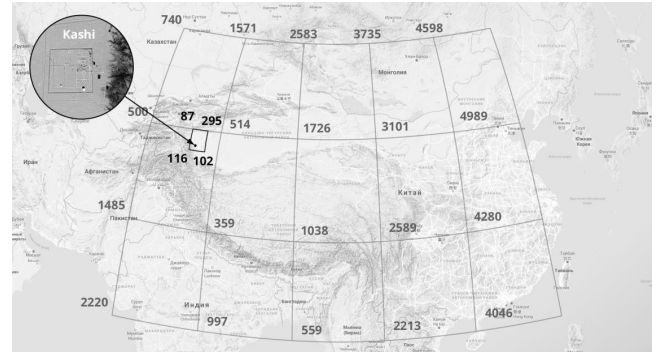


Рис. 3. СКО измеренной частоты эхо-сигнала от частоты, вычисленной по заданной радиолокационной модели в зависимости от соответствующей широты и долготы на географической карте

ющей антенны на Земле и частоты излучаемого сигнала.

Для определения координат передающей антенны ее географическая долгота, широта и высота места перебирались с заданным шагом и для каждого варианта вычислялась величина СКО измеренной частоты эхо-сигнала от вычисленной на заданном временном интервале с 14:41 UT до 15:50 UT 21 марта 2019 г. с шагом в 1 сек. Затем определялась область на поверхности Земли с наименьшими отклонениями, вычисления повторялись снова внутри этой области до тех пор, пока величина СКО переставала уменьшаться, достигнув значения  $\sigma = 0.065$ . При этом размеры области вероятного месторасположения антенны составили 7.7 м по широте, 7.1 м по долготе и 0.07 м по высоте соответственно. На последнем этапе проводилось уточнение частоты передаваемого сигнала, которая (исходя из наблюдений) варьировалась от 7209.1 МГц до 7209.15 МГц.

На рис. 2а пунктирными линиями представлены вычисленные по заданной радиолокационной модели изменения регистрируемой радиотелескопом РТ-13 частоты эхо-сигнала со временем, а на рис. 3 изображена географическая карта, на которую нанесены соответствующие значения среднеквадратических отклонений измеренной частоты от вычисленной в зависимости от широты и долготы передающей антенны. Широта и долгота места варьировались от  $20^\circ$  до  $50^\circ$  с.ш. и от  $70^\circ$  до  $130^\circ$  в.д. соответственно. Стрелкой отмечено найденное местоположение передающей антенны с координатами  $38.42125^\circ$  с.ш.;  $76.71466^\circ$  в.д.; 1485 м. Искомой передающей антенной оказалась 35-метровая антенна станции дальней космической связи Kashfi, что было однозначно установлено по общедоступной информации [7]. Уточненная частота передаваемого сигнала составила 7209.125 МГц. Отклонения измеренной частоты эхо-сигнала от найденного решения приведены на рис. 2б.

## Заключение

На радиотелескопе РТ-13 обсерватории «Бадарь» были проведены наблюдения отраженного от поверхности Луны радиосигнала заранее неизвестной передающей антенны одной из станций дальней космической связи КНР в X-диапазоне частот. В результате обработки наблюдений были получены высокоточные доплеровские измерения частоты зарегистрированного эхо-сигнала. Путем минимизации отклонений измеренной частоты эхо-сигнала от частоты, вычисленной по заданной радиолокационной модели, удалось определить местоположение передающей антенны на Земле и частоту передаваемого сигнала. При этом размеры области вероятного расположения антенны позволили однозначно отождествить 35-метровую антенну китайской станции дальней космической связи Kashi.

## Литература

1. Naugol'nya M. N., Spangenberg E. E., Soboleva N. S. et al. Selenographic coordinate measurement with RATAN-600 Radio telescope // *Pis'ma Astron. Zh.* 1978. Vol. 4. P. 302–304.
2. Chunlai Li, Jianjun Liu, Xin Ren et al. The Chang'e 3 Mission Overview // *Space Science Reviews*. 2015. Vol. 190, no. 1–4. P. 85–101.
3. Маршалов Д. А., Бондаренко Ю. С., Васильев М. В. и др. Наблюдения лунного модуля Chang'E-3 на радиотелескопах РТ-32 // *Труды ИПА РАН*. 2018. Вып. 47. С. 79–84.
4. Васильев М. В., Ягудина Э. И., Шарков В. С. и др. Предварительные результаты обработки фазовых радиолокационных наблюдений лунных посадочных аппаратов // *Труды ИПА РАН*. 2019. Вып. 49. С. 3–8.
5. Shuygina N., Ivanov D., Ipatov A. et al. Russian VLBI network “Quasar”: Current status and outlook // *Geodesy and Geodynamics*. 2019. Vol. 10, Issue 2. P. 150–156.
6. Бондаренко Ю. С., Маршалов Д. А. Планирование и обработка радиолокационных наблюдений в Институте прикладной астрономии РАН // *Труды ИПА РАН*. 2018. Вып. 47. С. 3–7.
7. Dezhen Xu, Guangliang D., Guangli W. 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.