

Использование радиолокации лунного посадочного аппарата Chang'E-3 для синхронизации удаленных стандартов частоты и калибровочных тестов

© В. Ли^{1,2,3}, Д. Пин^{1,2}, М. Ван^{1,2}, Д. Сан¹, Д. А. Маршалов⁴, Ю. С. Бондаренко⁴

¹Национальные астрономические обсерватории Китайской академии наук, г. Пекин, КНР

²Университет Китайской академии наук, г. Пекин, КНР

³Синьцзяньская астрономическая обсерватория, г. Урумчи, КНР

⁴ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

Реферат

При проведении высокоточных радиотехнических измерений с помощью КА, находящихся в окрестности Луны или в дальнем космосе, погрешности синхронизации стандартов времени и частоты станций слежения или РСДБ-станций приводят к дополнительным погрешностям в доплеровских, дифференциальных доплеровских и РСДБ-измерениях. Для решения этой проблемы авторами разработан и протестирован новый метод синхронизации стандартов времени и частоты с использованием передачи и калибровки частоты между удаленными станциями слежения за дальним космосом, и/или РСДБ-станциями.

К настоящему моменту в результате фазовой радиолокации Луны по программе Chang'E-3 получены измерения миллиметрового уровня точности. Эти наблюдения дают возможность удаленно синхронизировать стандарты частоты и провести калибровку. Измерения проводились двухпутевым и трехпутевым методами на китайских станциях дальней космической связи Jiamusi и Kashi. Кроме того, часть экспериментов по синхронизации стандартов частоты была проведена совместно с Россией. На основе программного обеспечения для векторной астрометрии Военно-морской обсерватории (Naval Observatory Vector Astrometry Software, NOVAS) создана и поддерживается программа для обработки радиолокационных измерений. Результатом применения этой программы явилось достижение субмиллиметровой точности в моделировании измерений дальности и скорости ее изменения, что позволяет проводить сравнительный анализ параметров, полученных как во время наблюдений, так и в результате математического моделирования. Таким образом, была достигнута точность синхронизации удаленных стандартов частоты на уровне нескольких мГц при измерениях в X-диапазоне.

Ключевые слова: опорная частота, посадочный аппарат Chang'E-3, наземная станция наблюдения, лунная радиолокация, высокоточные данные, синхронизация удаленных стандартов частоты.

Контакты для связи: Ли Венсяо (liwenxiao@xao.ac.cn).

Статья поступила в редакцию 20.01.2020, принята к публикации 24.03.2020, опубликована 01.10.2020.

Для цитирования: Ли В., Пин Д., Ван М., Сан Д., Маршалов Д. А., Бондаренко Ю. С. Использование радиолокации лунного посадочного аппарата Chang'E-3 для синхронизации удаленных стандартов частоты и калибровочных тестов // Труды ИПА РАН. 2020. Вып. 53. Р. 38–43.

<https://doi.org/10.32876/ApplAstron.53.38-43>

Remote Frequency Transferring and Calibration Test in Chang'E-3 Lunar Radio Ranging

W. Li^{1,2,3}, J. Ping^{1,2}, M. Wang^{1,2}, J. Sun¹, D. A. Marshalov⁴, Y. S. Bondarenko⁴

¹National Astronomical Observatories of China, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, China

³Xinjiang Astronomical Observatory, Urumqi, China

⁴Institute of Applied Astronomy of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia

Abstract

In very accurate open loop lunar and deep space mission tracking the tracking station frequency standard will introduce error into the Doppler and differential Doppler measurements. The same problem is encountered in VLBI delay rate deep space tracking. To solve this problem we developed and tested a new method using frequency transferring and calibration between remote deep space tracking stations and/or VLBI stations.

With the Chang'E-3 lunar lander and the ground application system of lunar exploration program Lunar Radio Ranging (LRR) highly accurate data were obtained of accuracy up to about several millimeters including the influence of ionosphere; the actual accuracy is now still better. High-precision observations provide opportunities for remote frequency transferring and calibration. In China we achieved two-way and three-way data exchange with the Chinese Deep Space stations at Jiamusi and Kashi. In joint research and observations of China and Russia we tested remote frequency transferring and obtained observational data. The theoretic ranging and velocity measurement program has been devel-

oped using the Naval Observatory Vector Astrometry Software (NOVAS). As a result of this program submillimeter and submillimeter per second accuracy was achieved. It allows comparative analysis of the parameters obtained from observations and from mathematic modeling. In frequency transferring we achieved a high precision level of about several MHz in the X band.

Keywords: clock frequency, Chang'E-3 lander, ground observation station, Lunar Radio Ranging, high-accuracy data, remote frequency transferring.

Contacts: Wenxiao Li (liwenxiao@xao.ac.cn).

Received January 20, 2020, accepted March 24, 2020, published October 1, 2020.

For citation: Li W., Ping J., Wang M., Sun J., Marshalov D. A., Bondarenko Y. S. Remote frequency transferring and calibration test in Chang'E-3 lunar radio ranging // Transactions of IAA RAS. 2020. Vol. 53. P. 38–43.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.53.38-43>

Введение

Развитие технологий управления межпланетными КА требует все более высокой точности дальномерных, доплеровских и РСДБ-измерений [1]. Для определения положения КА в дальнем космосе эти измерения выполняются с использованием стандартов времени и частоты станций слежения, в качестве которых обычно применяются активные водородные мазеры (водородные часы).

Китайская сеть дальнего космоса и РСДБ-станции должны синхронизировать тактовые частоты станций слежения с очень высокой точностью, чтобы минимизировать ошибки часов в доплеровских и дифференциальных доплеровских измерениях. Использование классического метода возимых часов для быстрого и одновременного сравнения частот водородных часов станций представляется слишком сложным.

Второй метод, применяемый при синхронизации, основан на использовании КА. Однако эфемериды КА и их доплеровские измерения не очень точны, что заметно влияет на погрешность синхронизации стандартов частоты. На китайских станциях слежения за дальним космосом и РСДБ-станциях установлены ГНСС-приемники, которые могут измерять разницу во времени между станцией и временем ГНСС с точностью 20–50 нс. ГНСС-измерения продолжительностью 2–4 недели дают возможность определить смещение между

стандартом частоты станции и системной частотой ГНСС на уровне точности в несколько единиц 10^{-12} с/с. Однако этот результат недостаточен и время измерения слишком велико, кроме того, дрейф частоты водородных часов не может быть получен быстрее, чем за пару недель.

Более точную синхронизацию хода часов разных станций можно получать с помощью фазовой радиолокации лунного посадочного аппарата Chang'E-3 (рис. 1).

Chang'E-3 — автоматической посадочный аппарат, управляемый Национальной космической администрацией Китая. Он был посажен на Луну 14 декабря 2013 г. в рамках второго этапа Китайской программы исследования Луны. Это была первая мягкая посадка на Луну после посадки советской станции Луна-24 в 1976 г. В настоящее время координаты Chang'E-3 на поверхности Луны составляют $44^{\circ}12'$ северной широты, $19^{\circ}51'$ западной долготы и 2640 м высоты. Наблюдение лунохода китайской сетью дальней космической связи продолжается до сих пор.

Радиолокационные и доплеровские наблюдения Луны

Уже 20 лет, начиная с 1999 г., во время проведения космических программ ученые изучают возможности фазового радиолокационного и доплеровского методов измерений. На рис. 2 изображен приемник для доплеровских измерений на базе разомкнутой петли, который был разработан для совместной российско-китайской марсианской миссии Фобос – Грунт и Yinghuo-1. Радиолокационные эксперименты, использующие этот тип приемника на наземных станциях, продолжают с различными исследовательскими целями во всех китайских проектах по изучению Луны [2].

Этот приемник был использован не только для доплеровских наблюдений, но и для измерений интегральной фазы при радиолокации посадочного аппарата Chang'E-3 в X-диапазоне на частоте 8470 МГц. Наблюдения проводила группа ученых, работающих в китайской программе изучения Луны и дальнего космоса, с применением РСДБ-станции, оборудованной водородным стандартом времени и частоты.

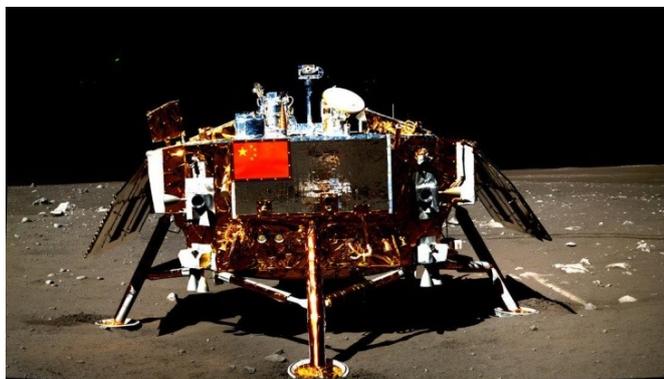


Рис. 1. Посадочный аппарат Chang'E-3: параболическая приемно-передаточная антенна с высоким коэффициентом усиления во время экспериментов по радиолокации в X-диапазоне



Рис. 2. Приемник для радиолокационных и доплеровских измерений

Проведение наблюдений

Сеансы непрерывных радиолокационных наблюдений длятся от 2–4 ч в X-диапазоне на частоте 8.47 ГГц [2] и проводятся двумя наземными станциями Jiamusi и Kashi (рис. 3, 4). Доплеровские радиолокационные измерения станции Jiamusi имеют точность до 0.2 мм/с на односекундном интервале. Что касается приемника, применяемого в эксперименте, то он может напрямую измерять фазу входного сигнала (отношение сигнал/шум между 10~30 дБ) от антенны с точностью 1×10^{-5} фазового цикла в секунду, используя местные водородные часы в качестве эталона частоты. Это означает, что для сигнала



a



b

Рис. 4. Станции китайской сети дальней космической связи Jiamusi — *a* и Kashi — *b*

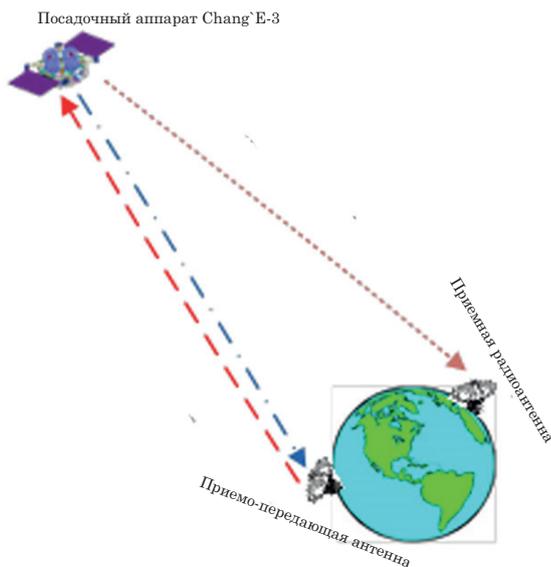


Рис. 3. Схема проведения радиолокационных наблюдений Луны

на несущей частоте 8.4 ГГц наш приемник может измерять мгновенную фазу с точностью и разрешением 10^{-15} .

Такая же точность доплеровских измерений была получена при наблюдениях на трех станциях Института прикладной астрономии Российской академии наук (ИПА РАН) (рис. 5). При использовании скользящего среднего с периодом выборки 10 с для получения доплеровского измерения, можно обнаружить небольшой шум на уровне 0.02 мм/с.

При проведении доплеровских измерений никак не учитывалась информация о расстоянии до локационной цели. Это означает, что если отношение сигнал/шум достаточно велико, то точность измерения доплеровской частоты не зависит от расстояния между целью и станцией слежения.

Высокоточные данные доплеровских наблюдений Chang'E-3 содержат информацию о динамике орбитально-вращательного движения Луны, из которой еще предстоит извлечь полезные научные данные [3].

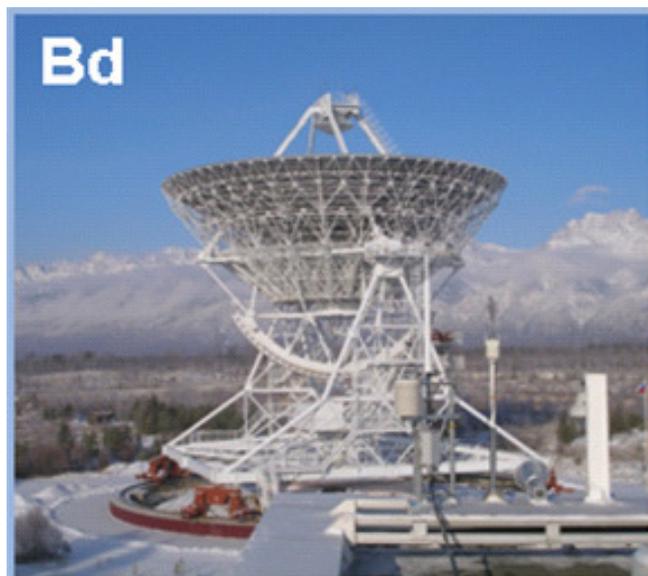


Рис. 5. Станции комплекса «Квазар-КВО»

Модель лунных радиолокационных наблюдений Луны и ее тестирование

На основе программного обеспечения NOVAS была создана (рис. 6) и до сих пор дополняется программа для обработки данных лунной радиолокации [4, 5].

Программа обеспечивает миллиметровую точность вычислений, что явилось результатом уточнения параметров теоретической модели, полученных при обработке наблюдений [6–7]. Высокоточные радиолокационные наблюдения могут быть использованы для изучения физической либрации и потенциала Луны.



Рис. 6. Модель радиолокационных наблюдений Луны

Для оценки этой модели произведено сравнение данных светолокации ретрорефлектора Apollo 15 французской станцией Grasse с использованием эфемерид DE430 и параметрами вращения Земли Международной службы вращения Земли IERS [3].

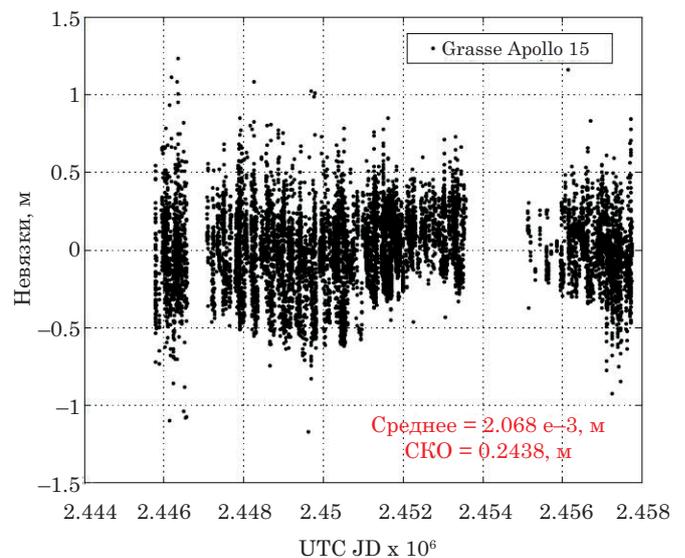


Рис. 7. Невязки светолокационных наблюдений до уточнения параметров модели измерений

Как видно из рис. 7, модель хорошо описывает данные наблюдений, что свидетельствует о ее корректности.

Метод синхронизации удаленных стандартов частоты

На основании данных фазовой радиолокации Chang'E-3 и модели этих измерений авторы разработали новый метод синхронизации удаленных стандартов частоты.

На рис. 8 показаны два метода сличения часов: прямое сравнение, при котором часы располагаются близко друг к другу, и метод синхронизации с помощью радиолокации Chang'E-3, при котором часы находятся на большом расстоянии друг от друга.

Результаты и выводы

При испытаниях второго метода в Китае были задействованы станции Jiamusi и Kashi, оснащенные водородными стандартами частоты. На международном уровне испытания этого метода проводятся между китайскими станциями дальней космической связи и станциями комплекса «Ква-

зар-КВО» ИПА РАН, расстояние между которыми достигает 4000 км.

В наблюдениях использовался односекундный период дискретизации для доплеровских измерений. Длительность экспериментов обычно составляла пару часов при наблюдениях только китайскими станциями и несколько меньше — при международных экспериментах.

Во время наблюдений точность сличения стандартов частоты станций Jiamusi и Kashi составила 7.7053×10^{-12} , а станций «Бадарь» и Kashi — 7.7397×10^{-13} .

Предварительные результаты двух тестов показывают (рис. 9), что передача частоты между удаленными часами станций РСДБ и станциями слежения за дальним космосом возможна, а точность передаваемой частоты достаточно высока для применяемого метода при использовании времени интегрирования 1 с. Также требуется учет дополнительных физических эффектов в модели измерений, выполняемых с применением этого метода. Необходимо проведение дальнейших исследований и совершенствование предложенного метода.

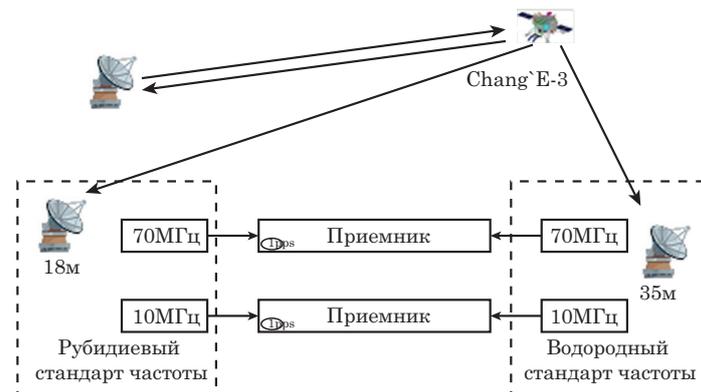


Рис. 8. Схема синхронизации удаленных стандартов частоты

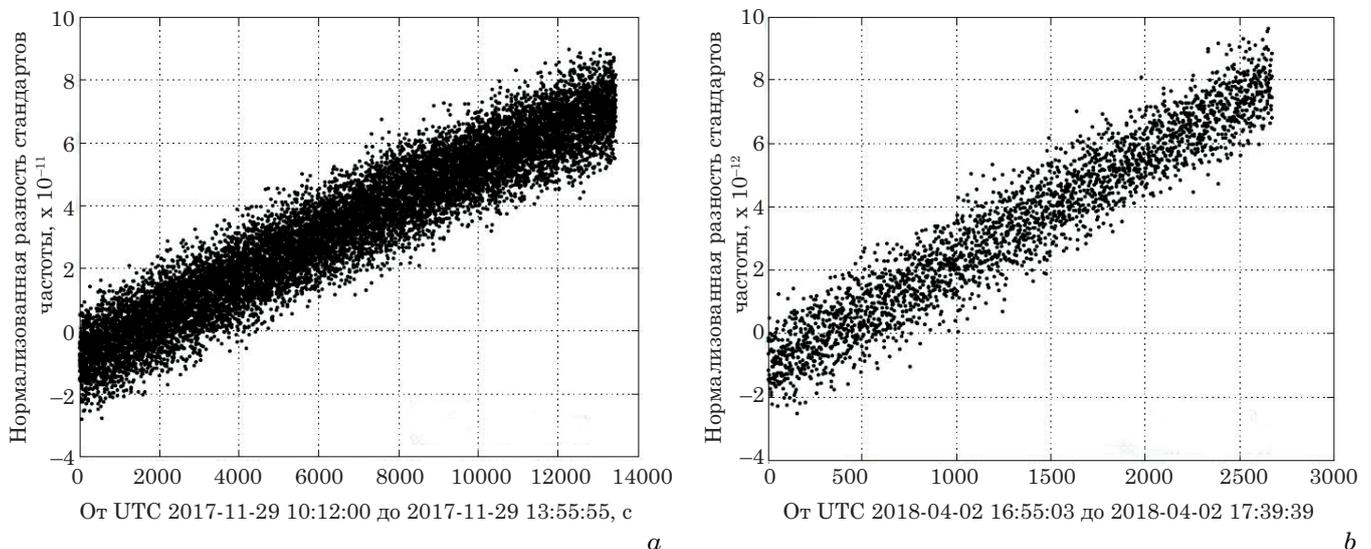


Рис. 9. Результаты сличения удаленных стандартов частоты (a — китайские тесты слева; b — китайско-российские тесты справа)

Благодарности

Эта работа поддерживается Национальным фондом естественных наук Китая (NSFC № 41590851, 11833001, 11603001 и 11973015), проектом по международному сотрудничеству между Китайской академией наук и Россией по изучению лунных систем координат (2018–2020), а также в рамках проекта НАОК по изучению вращения Луны (2017–2019).

Литература

1. *Han S. T., Ping J. S.* Deep space radio measurement. Beijing: China Machine Press, 2019. P. 16–37. (In Chinese).
2. *Li W. X.* The principle research of ground-based high-precision lunar radio ranging. Master's thesis. Beijing: Beijing Normal University, 2015. (In Chinese).
3. *Gerard P., Brian L.* IERS Conventions (2010) // IERS Technical Note. no. 36. 2010. 179 p.
4. *Moyer T. D.* Formulation for observed and computed values of deep space network data types for navigation. CA, USA: Deep Space Communications and Navigation Systems Center of Excellence, 2000.
5. *Marini J. W., Murray C. W.* Correction of laser ranging tracking data for atmospheric refraction at elevations above 10 degrees. Goddard Space Flight Center, 1973.
6. *Ping J. S., Li W. X., Han S. T., et al.* A newly descended method for detecting low-frequency gravitational waves from radio range and range-rate in Earth-Moon space // *Sci. Sin.-Phys. Mech. Astron.* 2017. Vol. 47: 059508. P. 1–8, doi: 10.1360/SSPMA2016-00321. (In Chinese).
7. *Tang W., Xu P., Hu S., et al.* Chang'E-3 lunar mission and upper limit on stochastic background of gravitational wave around the 0.01 Hz band // *Adv. Space Res.* 2017. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2017.06.008>.