

Исследования физической либрации Луны в Национальных астрономических обсерваториях Китая

© Д. Пин^{1,2}, В. Ли^{1,2,3}, М. Ван^{1,2}, Й. Ян⁴, В. Чжан⁵, Д. Чжан^{1,6}, С. Хан^{1,7},
Д. Сан¹, Л. Чен^{1,2,3,7}, А. В. Гусев⁸

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

²Университет Китайской академии наук, г. Пекин, КНР

³Синьцзянская астрономическая обсерватория, г. Урумчи, КНР

⁴Уханьский университет, г. Ухань, КНР

⁵Пекинский педагогический университет, г. Пекин, КНР

⁶Цилиньский Университет, г. Чанчунь, КНР

⁷Пекинский аэрокосмический центр управления, г. Пекин, КНР

⁸Казанский федеральный университет, г. Казань, Россия

Реферат

Исследования Луны продолжают оставаться серьезным вызовом для науки, технологий и бизнеса. К реализации международных и национальных лунных программ приступили новые участники, такие как Китай, Япония, Европейское космическое агентство (ЕКА) и Индия. Были запущены новые космические и посадочные аппараты, планируется создание возвращаемых лунных модулей и долговременных лунных баз. Тем не менее текущий уровень знаний о Луне не соответствует возникающим при реализации лунных программ требованиям. В частности, построение теорий вращения и внутреннего строения Луны является одной из не до конца решенных научных проблем. Дополнительные исследования в этой области позволят повысить безопасность, энергетическую эффективность и точность навигации при реализации лунных программ. Для того чтобы осуществить китайскую программу по посадке на Луну и возвращению человека на Землю, в Национальных астрономических обсерваториях Китая (НАОК) проводятся исследования с целью улучшения эфемерид Луны, а также для изучения внутренней структуры и эволюции Луны, сравнительной динамики планет Солнечной системы и физической либрации Луны. Серия экспериментов по лунным радиотехническим измерениям была проведена в Китае совместно с международными институтами. В этих экспериментах исследовались некоторые эффекты физической либрации Луны, которые могут повлиять на деятельность перспективных лунных станций.

Keywords: исследования Луны, физическая либрация Луны, посадка на Луну, вращение Луны, лазерная локация Луны, радиолокация Луны.

Контакты для связи: Пин Джинсон (jsping@bao.ac.cn).

Статья поступила в редакцию 20.01.2020, принята к публикации 13.02.2020, опубликована 01.10.2020.

Для цитирования: Пин Д., Ли В., Ван М., Ян Й., Чжан В., Чжан Д., Хан С., Сан Д., Чен Л., Гусев А. В. Исследования физической либрации Луны в Национальных астрономических обсерваториях Китая // Труды ИПА РАН. 2020. Вып. 53. Р. 9–17.

<https://doi.org/10.32876/ApplAstron.53.9-17>

Research of Lunar Physical Libration at the National Astronomical Observatories of China

J. Ping^{1,2}, W. Li^{1,2,3}, M. Wang^{1,2}, Y. Yang⁴, W. Zhang⁵, J. Zhang^{1,6}, S. Han^{1,7},
J. Sun¹, L. Chen^{1,2,3,7}, A. V. Gusev⁸

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

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, China

³Xinjiang Astronomical Observatory, Urumqi, China

⁴Wuhan University, Wuhan, China

⁵Beijing Normal University, Beijing, China

⁶Jilin University, Changchun, China

⁷Beijing Aerospace Control Center, Beijing, China

⁸Kazan Federal University, Kazan, Russia

Abstract

Since the beginning of the new century exploration of the Moon became a new frontier of science, technology and business, with new members like China, Japan, ESA and India joining in. New orbiters and landers have been launched, and future sample return and longterm lunar base missions are planned. However, the current knowledge of the Moon

does not quite meet the new demands. Knowledge about the rotation and internal structure of the Moon is among the scientific problems, which are not fully solved. Scientific research in this field can contribute to increasing safety, energy efficiency, and precision of control in lunar missions. In order to realize the program of future Chinese lunar landing and manned returning missions the National Astronomical Observatories of China (NAOC), CAS, carry out investigations aimed at improving the lunar rotation ephemeris and revealing the lunar internal structure and evolution, study comparative dynamics of the solar system terrestrial planets, the lunar physical libration (LPhL), and new detection methods. A series of radio link experiments has been carried out in China in cooperation with international institutions. Besides, some effects of lunar physical libration on activities of the future lunar surface bases are also being investigated.

Keywords: lunar exploration, lunar physical libration, lunar landing, lunar rotation, lunar laser ranging, lunar radio ranging, NAOC, methods.

Contacts: Jinsong Ping (jsping@bao.ac.cn).

Received January 20, 2020, accepted February 13, 2020, published October 1, 2020.

For citation: Ping J., Li W., Wang M., Yang Y., Zhang W., Zhang J., Han S., Sun J., Chen L., Gusev A. V. Researches of lunar physical libration at the National Astronomical Observatories of China // Transactions of IAA RAS. 2020. Vol. 53. P. 9–17.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.53.9-17>

Введение

Физическая либрация Луны детально изучалась с конца 1960-х годов с помощью оптических ретрорефлекторов, установленных на видимой стороне Луны. Для этого использовалась многослойная модель Луны, основанная на данных о лунных землетрясениях, которая позволяла моделировать и анализировать вращение Луны, а также находить периодические компоненты с большой амплитудой как для вынужденной, так и для свободной либрации Луны. Наблюдатели используют технику светолокации Луны для измерений и прогнозирования вращательного движения Луны, а также для определения параметров многослойных моделей Луны. Ученые и потребители пытаются изыскать возможность улучшения исследований путем сравнения различных результатов.

НАОК (Национальные астрономические обсерватории Китайской академии наук) с самого начала участвовали в китайских орбитальных и посадочных космических программах. Также они ответственны за лунные исследования, траекторные измерения и научное оборудование. С момента присоединения команды авторов к НАОК в 2012 г., исследования орбитально-вращательного движения Луны усилились радиотехническими наблюдениями планет, проводимыми в Шанхайской астрономической обсерватории.

С целью реализации перспективной программы приземления на Луну и возвращения человека на Землю, в НАОК проводятся работы по улучшению теории вращения Луны, изучается ее внутренняя структура и эволюция, сравнивается динамика планет земной группы, а также рассматривается теория физической либрации Луны и новые методы измерений.

При поддержке и в рамках сотрудничества с Национальными астрономическими обсерваториями Японии и России, в рамках программы для

приглашенных ученых и программ для аспирантов [1], в НАОК активизировались аналитические исследования физической либрации Луны (ФЛЛ). В результате чего были уточнены некоторые параметры вынужденной и свободной лунной либрации согласно однослойной и двухслойной модели Луны.

В рамках другой аспирантской программы авторы пытались разработать независимый алгоритм для расчета ФЛЛ с использованием двухслойной модели. Российские и французские коллеги оказали заметную помощь в ходе данной работы, в результате чего китайское ПО может обеспечить прогноз параметров вращения Луны с требуемой точностью. Работы в этом направлении все еще не закончены.

Для вычисления параметров орбитально-вращательного движения Луны в Китае используется не только традиционная лазерная локация, но и предложенный авторами новый метод радиолокации. Для реализации метода были разработаны радиоприемные системы двух поколений, которые основаны на программном подходе и применяются для лунных измерений и измерений в дальнем космосе. В высокоточных радиолокационных и доплеровских измерениях используются радиоастрономические антенны и китайская лунная станция Chang'E-3, расположенная рядом с посадочной платформой. Новый метод представляется перспективным для исследований динамики Земли и Луны. Серия экспериментов по радиолокации Луны проводилась как в Китае, так и с участием иностранных институтов. Данные были проанализированы для использования в различных приложениях.

Для осуществления перспективных программ по созданию лунных баз, обитаемых и/или автоматических, авторы учитывают долгосрочные эффекты ФЛЛ и используют численные методы для моделирования и анализа ее влияния на работу будущих станций.

Аналитические исследования физической либрации Луны в НАОК

Аналитические исследования подразумевают такие работы, как моделирование многослойной Луны, измерение долгопериодических компонент лунного гравитационного поля и изучение периодических составляющих физической либрации, имеющих большую амплитуду. Приоритетно в НАОК проводятся исследования по последним двум направлениям [1, 2].

Китайские лунные орбитальные КА программы Chang'E дали возможность измерения и оценки долгопериодических компонент гравитационного поля Луны. В программе Chang'E-1 орбитальный аппарат находился на орбите в два раза выше, чем орбиты КА Lunar Prospector и Kaguya/SELENE, и имел больший интервал времени между двумя последовательными сеансами связи. Это означает, что траекторные измерения, которые по точности примерно равны измерениям других КА, более чувствительны к долгопериодическим членам модели гравитационного поля Луны. Используя эти траекторные измерения, авторы уточнили число Лава k_2 и коэффициенты при младших гармониках модели лунного гравитационного поля (рис. 1). Авторские оценки с уточненными параметрами показывают, что Луна, нагре-

ваемая на границе ядра и мантии приливным воздействием Земли, продолжает оставаться активной на протяжении последних 4 млрд лет. Этот вид внутренней термодинамической активности может поддерживать и непосредственно способствовать свободной либрации Луны.

Для улучшения измерительных возможностей на следующих этапах программы Chang'E, авторы предложили использовать линию связи высокоорбитальный КА — низкоорбитальный КА и линию связи Земля — КА — поверхность Луны. Радиотехнические устройства, описанные в этой статье, могут быть применены для получения очень точных траекторных измерений, которые будут затем использоваться для уточнения числа Лава k_2 , J_2 и секторальных гармоник модели гравитационного потенциала Луны.

Второе направление аналитических исследований ФЛЛ в НАОК, которое осуществляется при поддержке российских и японских коллег, состоит в изучении периодических составляющих ФЛЛ, имеющих большую амплитуду, с использованием новой модели Луны. Эта модель описывает двухслойную Луну, состоящую из твердой коры, мантии, а также жидкого ядра. Для получения разумных значений момента инерции Луны как твердого тела применяются современные лунные

Таблица

Примеры периодов свободной либрации Луны при использовании двухслойной модели

Параметры	Твердая Луна	Ассиметричное лунное ядро	Единицы
Периоды в долготе	1.04529×10^3	1.04515×10^3	сутки
Периоды в широте (MR)	27.2958	27.30687	сутки
Периоды в широте (SR)	2.886502×10^4	5.04435×10^4	сутки
Периоды колебаний	2.707987×10^4	6.22678×10^4	сутки

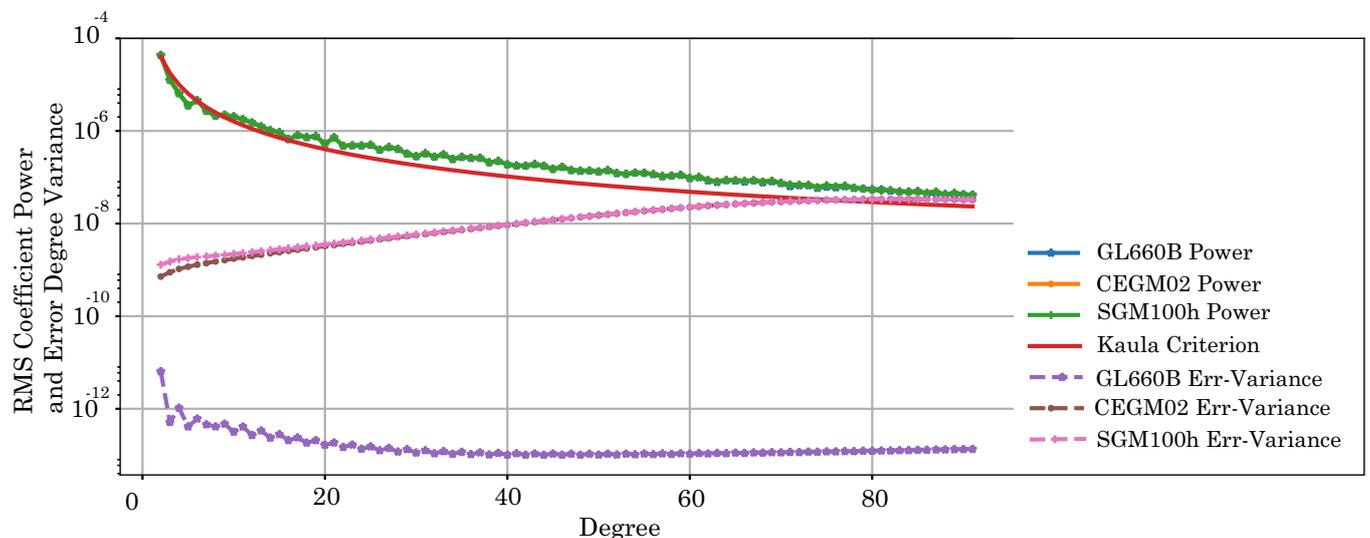


Рис. 1. Спектры мощности для различных моделей гравитационного поля Луны. Математическая модель полученных результатов представлена в работе [4]

эфемериды. С помощью полученных из эфемерид параметров и ограничений периоды и амплитуды свободной либрации Луны были оценены путем нахождения аналитических решений для дифференциальных уравнений вращения Луны как твердого тела. Аналогичная работа была проделана для долготных членов вынужденной либрации Луны. Основываясь на результатах ранее проведенных исследований [1, 2], авторы приводят новые данные (см. табл.) в качестве результата проведенной работы.

Численные методы исследования ФЛЛ

Исследование ФЛЛ, проводимое в НАОК в течение ряда лет, — одна из ключевых задач для построения эфемерид Луны [3, 4]. Углы физической либрации Луны (σ , ρ , τ) определяются как малые добавки к углам, вычисленным по закону Кассини:

$$\varphi_c = \Omega + \sigma, \theta_c = I + \rho, \varphi_c + \psi_c = \pi + LM + \tau \quad (1)$$

где φ , θ и ψ — углы Эйлера; LM — средняя долгота Луны, Ω — долгота восходящего узла Луны и I — наклон эклиптики к среднему лунному экватору, равный примерно $5554''.8$. Поскольку угол σ очень мал, значительно меньше угла ρ , обычно используют произведение σ на I , которое сравнимо по величине с ρ [5]. Тогда углы физической либрации вводятся как $(I\sigma, \rho, \tau)$, где первые два из них относятся к либрации широте, а τ — к либрации в долготе.

Оценена физическая либрация Луны с использованием однослойной и двухслойной модели Луны. Анализ разности углов Эйлера позволил оценить амплитуды эффектов, вызванных различием этих моделей. При расчетах, за исключением дополнительных параметров двухслойной модели, все остальные параметры и ограничения были приняты одинаковыми. Результаты вычислений приведены на рис. 2. Разница находится на уровне десятков миллисекунд.

Авторы заметили существенные расхождения J_2 и k_2 по данным различных моделей гравитационного потенциала Луны. Отметим, что J_2 и k_2 являются двумя ключевыми параметрами для численных моделей физической либрации. Разность углов Эйлера для двухслойных моделей, вычисленных с использованием различных версий гравитационного потенциала Луны, приведены на рис. 3. Влияние ошибок J_2 и k_2 на разность углов Эйлера заметно больше, чем при замене однослойной модели Луны на двухслойную. В настоящее время мы продолжаем исследовать этот эффект.

Кроме того, различные эфемериды Земли и Луны были сравнены на интервале 100 лет. Результаты сравнения согласуются с работами других авторов, разность эфемерид находится на уровне одного метра.

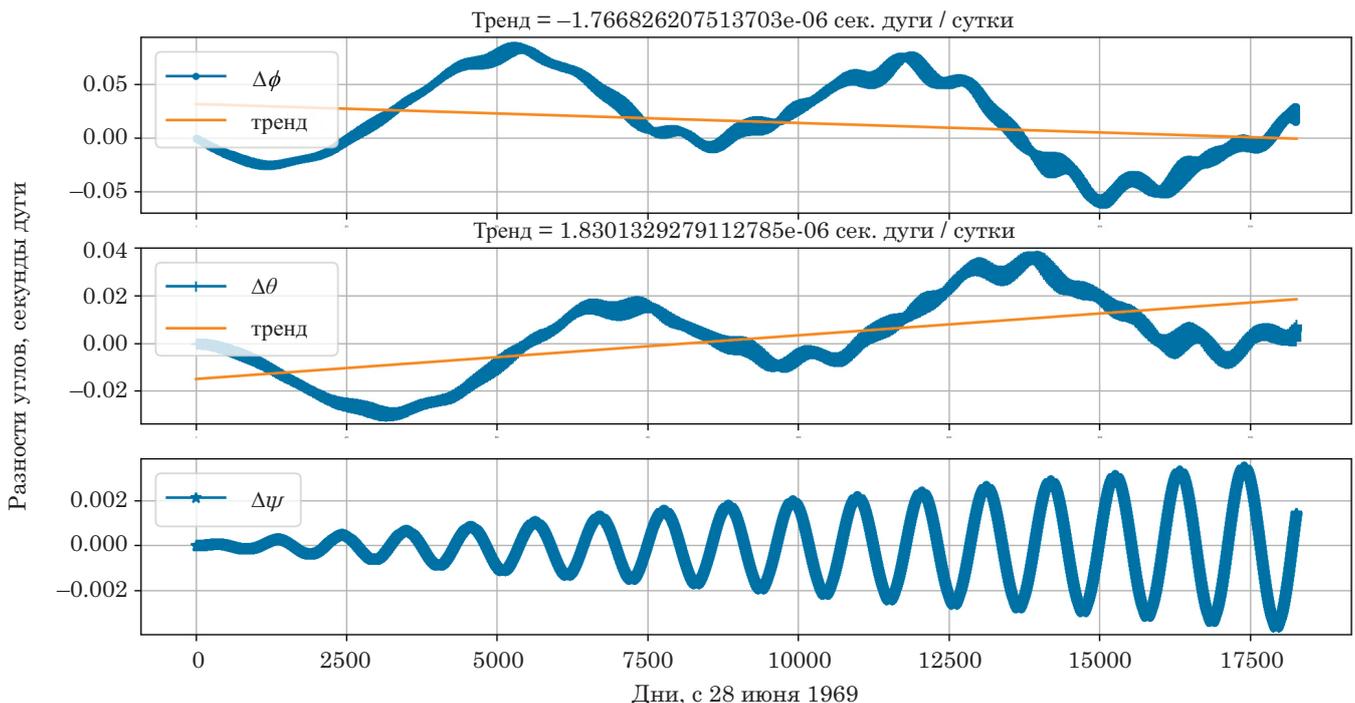


Рис. 2. Разность углов Эйлера для одно- и двухслойной моделей

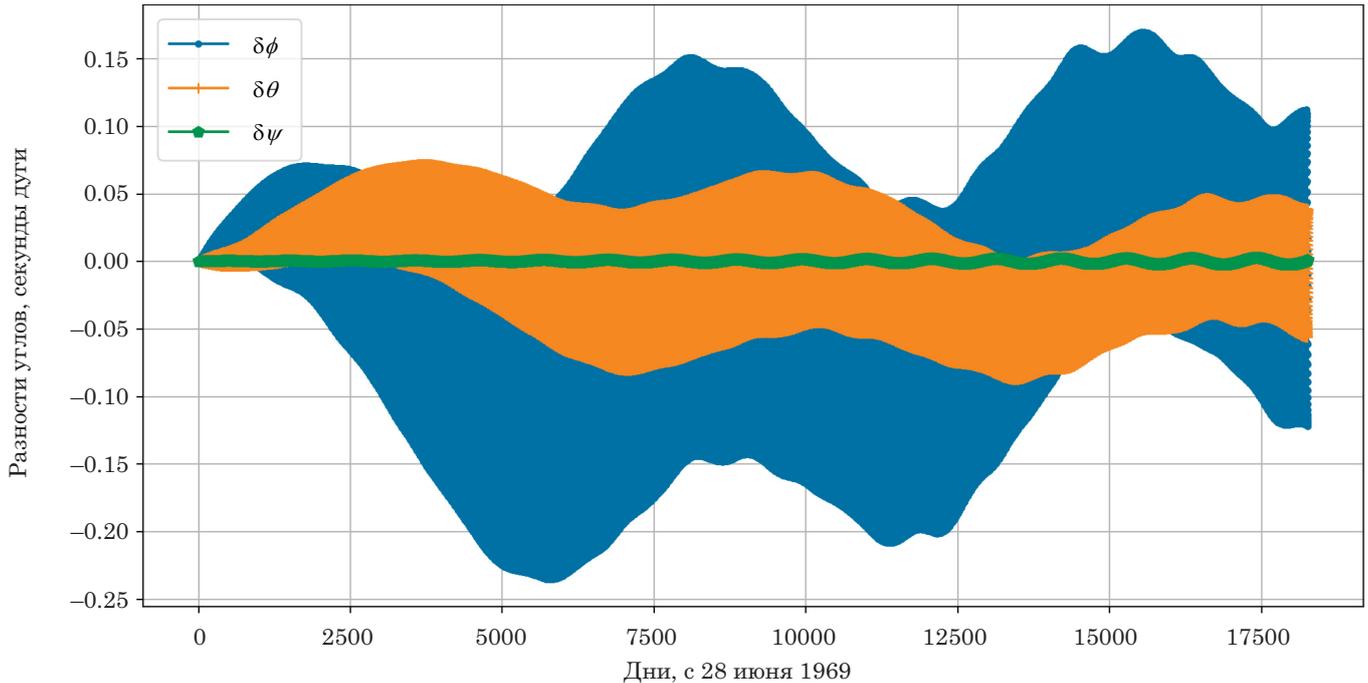


Рис. 3. Разность углов Эйлера для двухслойных моделей, построенная с использованием гравитационных потенциалов Луны по данным GRAIL и Chang'E-1

Фазовая радиолокация Луны и доплеровские измерения

Начиная с 1999 г. в течение 20 лет фазовая радиолокация и доплеровские измерения использовались авторами в различных космических программах [6, 7]. Для совместных программ России и Китая по изучению Марса Фобос — Грунт и Yinghuo-1 авторы разработали следящую систему для доплеровских и фазовых измерений. С использованием этой системы на китайской РСДБ-станции были проведены измерения в рамках китайской лунной программы для проведения разных исследований.

В аппаратуре посадочного аппарата Chang'E-3 был обновлен регистратор, поэтому появилась возможность измерять не только интегрированный доплеровский сдвиг частоты, но и интегральную фазу несущей сигнала между КА и наземным радиотелескопом. В диапазоне X (8470 МГц) была испытана фазовая радиолокация Луны и доплеровские измерения с применением РСДБ-станции и водородного стандарта времени и частоты. Данные таких измерений космических и посадочных аппаратов могут быть использованы для научных исследований Луны и планет.

На рис. 4 показана конфигурация антенн на посадочном аппарате Chang'E-3. Отметим, что на КА Chang'E-3/4 установлены транспондер и передатчик. Транспондер, который может принимать несущую радиосигнала в S/X диапазоне, передаваемого недавно построенными китайскими стан-

циями дальней космической связи, которые оборудованы высокостабильным водородным стандартом времени и частоты. Часы РСДБ-станций и станций дальней космической связи могут быть синхронизированы со шкалой UTC с точностью до 20 нс по сигналам ГНСС. В будущем планируется довести эту точность до 5 нс и лучше, достигнув уровня других сетей дальней космической связи.

После использования аналого-цифрового преобразователя (примерно такого же, какой используется в РСДБ) для захвата сигнала несущей на выходе промежуточной частоты радиотелескопа были разработаны два идентичных устройства для проведения фазовой радиолокации и доплеровских



Рис. 4. Посадочный аппарат СЕ-3: параболическая антенна с большим усилением, которая работает в диапазоне X в экспериментах по радиолокации

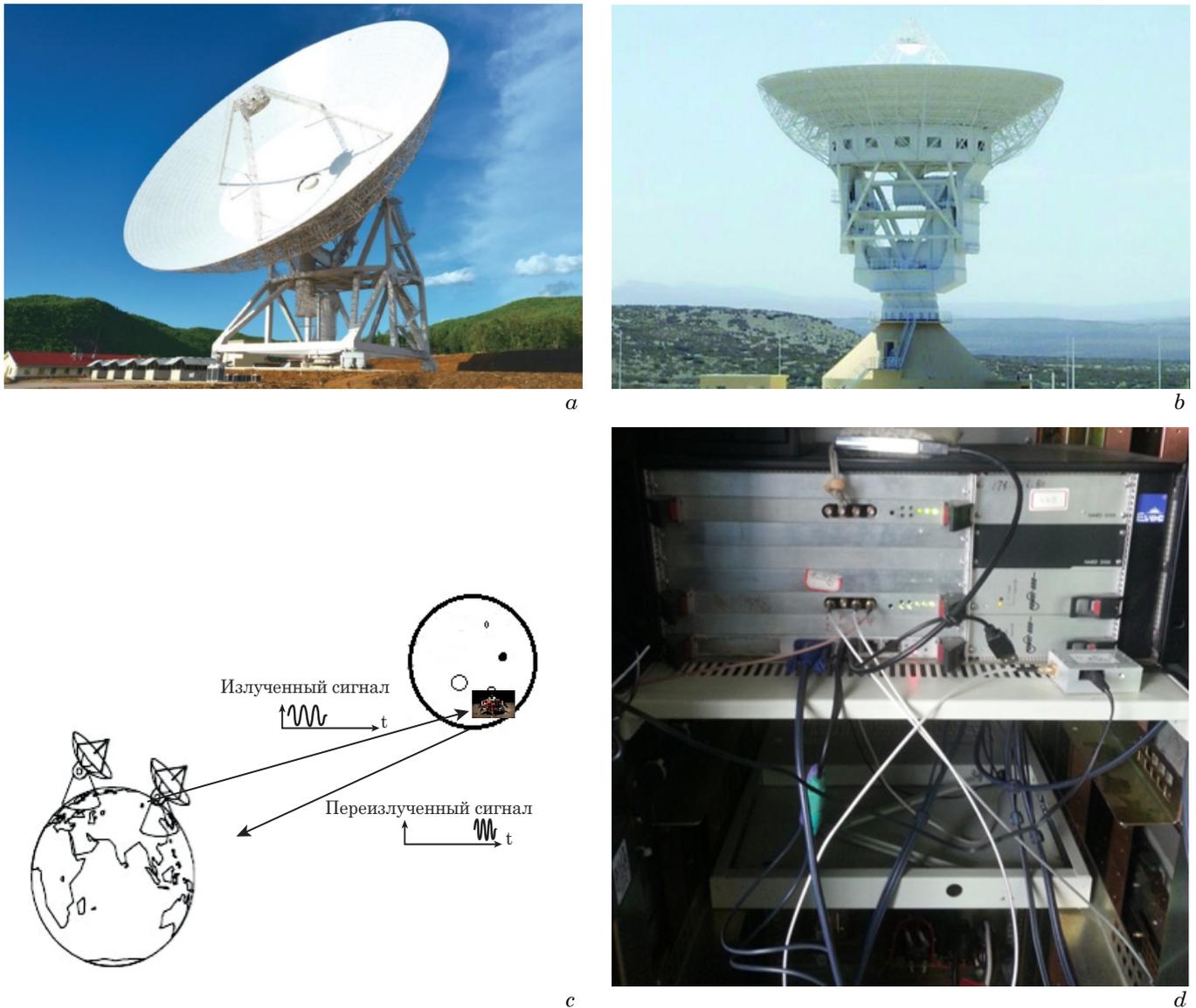


Рис. 5. Фазовая радиолокация посадочного аппарата SE-3: *a*, *b* — два радиотелескопа, *c* — схема наблюдений, *d* — программный приемник для фазовой радиолокации

измерений, когда наблюдения проводятся либо одной антенной, совмещающей передачу и прием сигнала, либо двумя антеннами, одна из которых передает, а другая принимает переизлученный КА радиосигнал (рис. 5).

Первый тип наблюдений представляет собой комбинацию традиционных интегральных доплеровских измерений и использования многоступенчатых цифровых полосовых фильтров на базе программируемой вентильной матрицы для получения сверхузкополосной несущей во временной области. Затем подсчитывается интегральная фаза, из которой дифференцированием с очень высокой точностью вычисляется доплеровская частота. Расчет интегральной фазы производится путем сложения всех доплеровских частот от начала сеанса и до момента каждого нового измерения. На рис. 5*d* показана измерительная аппаратура, а на

рис. 6 показаны невязки фазовых и доплеровских измерений.

Другой тип измерений — это корреляционный метод, применяемый при РСДБ-измерениях КА в дальнем космосе. Этот метод предполагает использование точных моделей движения наблюдательной станции и КА для моделирования несущей и/или поднесущей частоты, а затем ее корреляцию с записанным сигналом. Использование нелинейных моделей может приводить к большим ошибкам, также в этом случае требуется наличие большого опыта в таких областях, как астрометрия, астродинамика, математика, радиотехника и обработка сигналов. Кроме того, при применении корреляционного метода может быть достигнут меньший прогресс, поскольку он был предложен около 20 лет назад. Коллектив авторов нашел новое решение для этого метода, основанное только

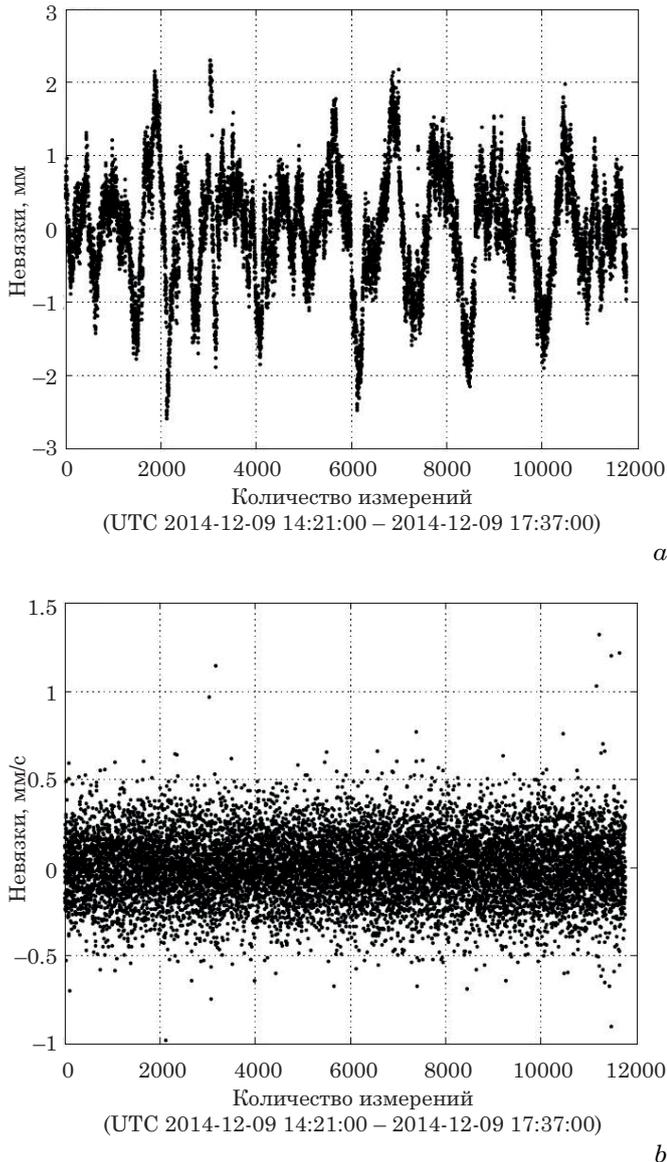


Рис. 6. Невязки наблюдений: *a* — с атмосферными погрешностями, *b* — без атмосферных погрешностей

на обработке сигналов посредством использования линейного предвычисления несущей и/или поднесущей частоты пошагово от начала измерений, а затем корреляции полученной модели с принятым в следующий момент времени сигналом. Этот метод позволяет получить очень точные доплеровские измерения, а затем использовать их для измерения интегральной фазы, как это описано выше.

В предварительных экспериментах по фазовой радиолокации Chang'E-3 были получены наблюдения с интервалом 1 с и разрешением 0.2 мм или лучше, СКО невязок этих измерений составило примерно 2–3 мм после устранения погрешностей тропосферы и ионосферы. Фазовая радиолокация Луны может стать новым астрометрическим методом для измерения параметров орбитально-вращательного движения Земли и Лу-

ны, в том числе с колокацией с измерениями лунных лазерных дальномеров. Коллектив авторов проводит китайские и международные эксперименты по фазовой радиолокации Луны совместно с РСДБ-комплексом «Квазар-КВО». Результаты этих исследований могут быть использованы в лунных программах Китая и России.

Влияние ФЛЛ на освещенность поверхности Луны

Освещенность Луны является одним из ключевых факторов геологической эволюции лунной поверхности и является основным источником энергии для будущих обитаемых лунных баз [8, 9]. Из-за оптической и физической либрации Луны условия освещенности и эволюции поверхности, особенно на высоких широтах и в районе полюсов, сильно изменяются в течение длительных периодов времени. Авторский коллектив усовершенствовал алгоритм расчета освещенности, а затем рассчитал освещенность поверхности Луны на длительных интервалах времени с учетом ФЛЛ.

Уровень освещенности имеет большое значение для выбора места посадки и для изучения эволюции лунной поверхности. В наших расчетах уровень освещенности определяется как сумма часов, в течение которых Солнце выше горизонта, деленная на общее время. Мы использовали улучшенную модель и алгоритм для расчета интенсивности освещения для различных периодов физической либрации Луны в полярных регионах выше 87.5° с 1 января 2015 г. по 8 августа 2033 г. и проанализировали освещенность лучших точек, а также влияние лунной прецессии на условия освещенности. Результаты на интервале 18.6 лет приведены на рис. 7.

На рис. 7а показана карта распределения освещенности северного полюса на интервале 18.6 года. 98.4 % всех уровней освещенности в северных полярных регионах в широтах выше 87.5° не превышают 50 %. Хорошо освещенные участки в основном расположены в высокогорных районах и по краям четырех кратеров. Распределение освещенности в южных полярных регионах в широтах выше 87.5° на том же интервале показано на рис. 7б. Область, где уровень освещенности менее 50 %, меньше и составляет 97.57 %. Хорошо освещенные области расположены на северо-западном краю кратера De Gerlache (87.1°W , 88.5°S), на соединительном хребте между кратерами Shackleton (0°E , 89.9°S) и Sverdrup (152°W , 88.5°S). Кроме того, приведены разности в уровнях освещенности для северного и южного полюсов по результатам, полученным на интервалах от 1 до 18.6 лет, см. рис. 8.

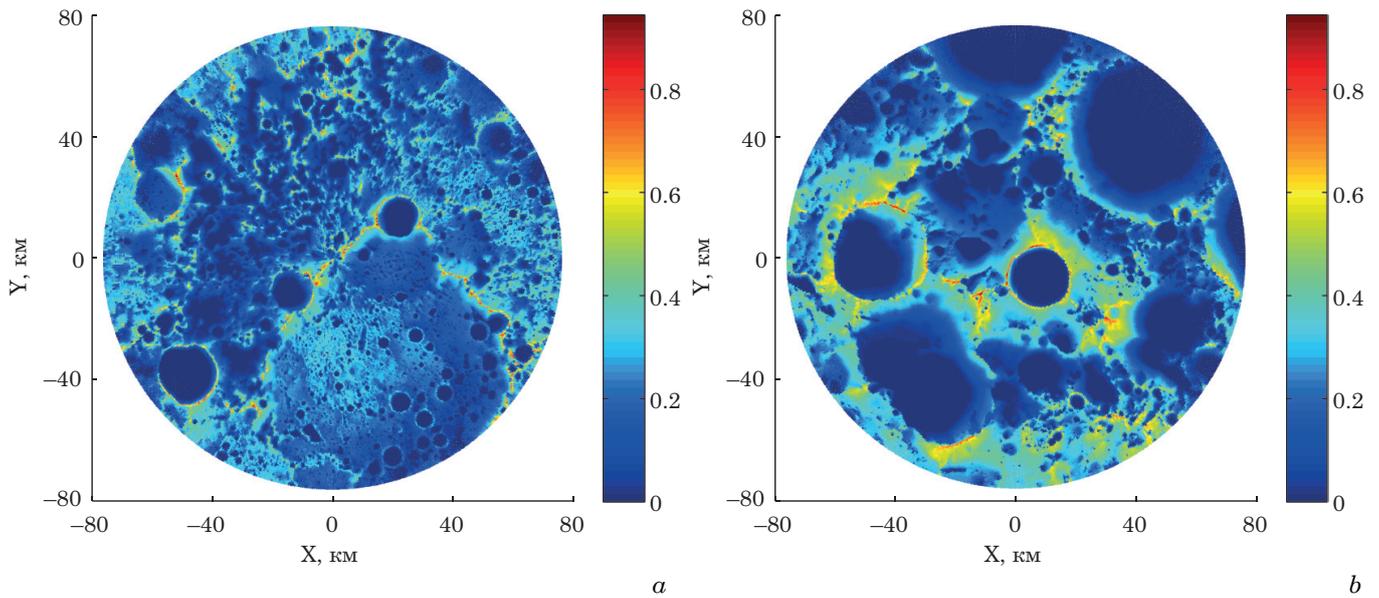


Рис. 7. 18.6-летние уровни освещенности *a* — северного и *b* — южного полюса

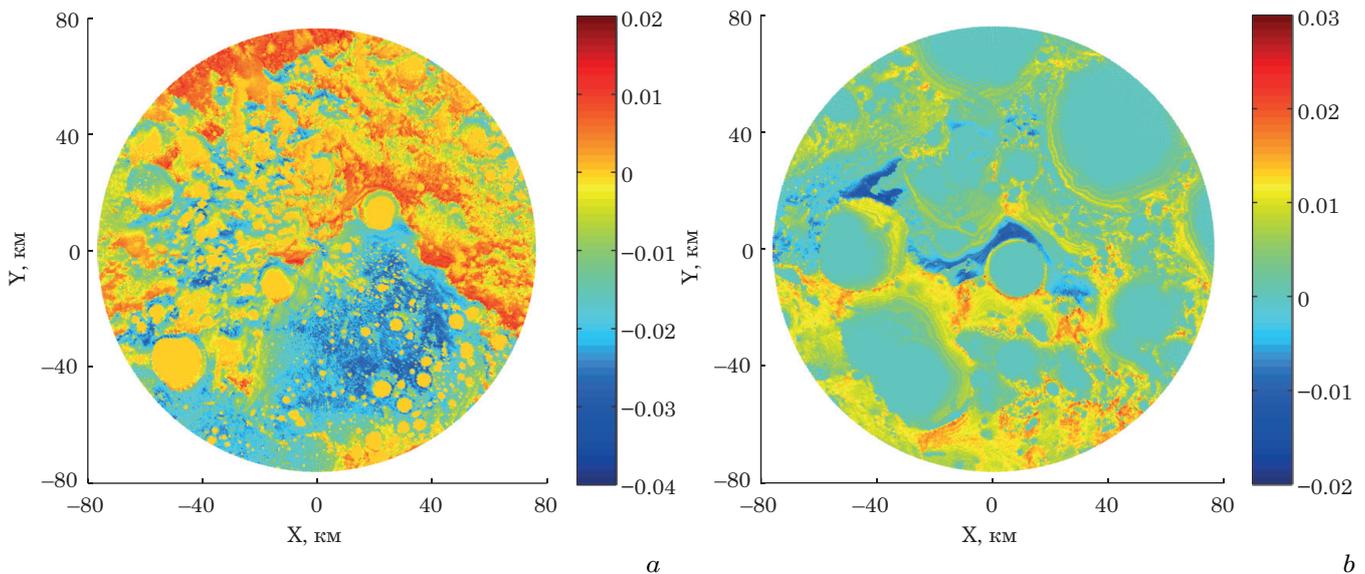


Рис. 8. Разность уровней освещенности для северного — *a* и южного полюса — *b* по результатам, полученным на интервалах от 1 до 18.6 лет

Выводы

В 21 веке Китай присоединился к сообществу стран, которые имеют лунные исследовательские программы, и запланировал две серии проектов: исследования с помощью беспилотных КА и обитаемую лунную базу. Для реализации всех запланированных проектов требуется высокоточная информация об орбитально-вращательном движении Луны. Чтобы удовлетворить это требование, НАОК изучают, проводят измерения и разрабатывают китайскую версию численной модели физической либрации Луны. Данная статья кратко знакомит с этой работой и возможными направлениями изучения внутренней структуры Луны. Кроме того,

авторский коллектив пытается использовать информацию о физической либрации Луны при выборе места приземления на лунной поверхности с помощью анализа уровней освещенности. В будущем команда авторов планирует разрабатывать методику совместной обработки светолокационных и фазовых радиолокационных измерений данных для изучения динамики Луны вместе с одним из ведущих научных центров, например в России.

Благодарности

Эта работа поддерживается Национальным фондом естественных наук Китая (NSFC № 41590851, 11833001, 11603001 и 11973015), а также проектом по международному сотрудниче-

тву между Китайской академией наук и Российскими научными институтами по изучению лунных систем координат (2018–2020), а также в рамках проекта НАОК по изучению вращения Луны (2017–2019).

Литература

1. *Li W. X.* The principle research of ground-based high-precision lunar radio ranging. Master's Thesis. Beijing: Beijing: Normal University, 2015. (In Chinese).
2. *Li W. X., Gusev A., Ping J. S., Zhang T. J.* Free and forced librations of two-layer structure of the Moon // *Journal of deep space exploration*. 2015. Vol. 1, no. 3. P. 205–209. (In Chinese).
3. *Yang Y. Z.* Numerical study of the Moon's rotation. Ph. D. Thesis. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2017. (In Chinese).
4. *Yang Y. Z., Ping J. S., Yan J. G., Li J. L.* Comparison and analysis on lunar rotation with lunar gravity field models // *Astrophys. and Space Sci.* 2018. no. 393: 191. P. 1–9. URL: <https://doi.org/10.1007/s10509-018-3413-z>.
5. *Newhall X. X., Williams J. G.*, Estimation of the lunar physical librations. *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*. 1997. Vol. 66. P. 21–30.
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. *Han S. T., Ping J. S.* Deep space radio measurement. Beijing: China Machine Press, 2019. P. 16–37. (In Chinese).
8. *Zhang J. D.* Research on the illumination model of the Moon using LOLA data and its significance. Master's Thesis. Changchun: Jilin University, 2017. (In Chinese).
9. *Zhang J. D., Meng Z. G., Zhu Y. Z., et al.* Research on solar radiation of Von Kármán crater using LOLA data // *Journal of Deep Space Exploration*. 2018. Vol. 5, no. 1. P. 12–19. (In Chinese).