

УДК 523.34

eLIBRARY.RU: 41.19.25

А.В. Гусев¹, Ж. Менг², З. Пинг³

¹*Казанский федеральный университет, г. Казань*

²*Цилинский университет, г. Чанчунь, Китай*

³*Национальная астрономическая обсерватория Академии наук
Китая, г. Пекин (Китай)*

ЛУННОЕ ВРЕМЯ И ЛУННАЯ НАВИГАЦИЯ LUNAR TIME AND LUNAR NAVIGATION

Аннотация. В обзоре обсуждаются научные, координатно-временные и навигационные проблемы лунных зондов на поверхности Луны и в окололунном пространстве.

Ключевые слова: Луна, селенодезия, лунное время и навигация.

Abstract. The review discusses the scientific, coordinate-time and navigational problems of lunar probes on the lunar surface and in the circumlunar space of the Moon.

Keywords: Moon, selenodesy, lunar time and lunar navigation.

Введение

За последние 25 лет мощные, глубокие и комплексные исследования спин-орбитального вращения и внутреннего строения многослойной Луны подготовили новую эру научного, прикладного и промышленного освоения Луны, и на ближайшее десятилетие уже запланированы десятки лунных миссий различных космических агентств и с различными целями [1-14].

В настоящее время ученые и инженеры Китая работают над следующей серией лунных миссий: корабль «Чаньэ-6» заберет первые образцы лунного грунта с обратной стороны Луны в 2025 году, многоцелевой космический корабль «Чаньэ-7», который планируется запустить в 2026 году и среди других задач будет искать водяной лед в затененных кратерах Луны. Корабль «Чаньэ-8», который должен приземлиться на Луне примерно в 2028 году, заложит основу для более крупного проекта “International Lunar Research Station” (ILRS), которую Китай и Россия планируют построить в 2030-2035-х годах. ILRS будет состоять из посадочного модуля, обитаемого бункера, орбитального аппарата и лунохода и будет включать в себя испытание

первых технологии использования лунных ресурсов на поверхности Луны. Также китайские коллеги рассматривают возможность 3D-печати лунных кирпичей с использованием материалов с лунной поверхности [16].



Рисунок 1 Совместное изучение Луны Китаем и Россией

Для энергоснабжения китайской лунной базы будет использоваться ядерная установка. 3D-печать для космической деятельности на Луне рассматривалась и тестировалась в течение последних лет. Европейское космическое агентство (ЕКА) работает над изготовлением лунных кирпичей с имитацией лунного реголита.

Программа объединенной пространственно-временной системы отсчета на Луне.

После быстрого прогресса человеческой деятельности в лунном пространстве и на лунной поверхности запрос на получение локальных данных лунного пространства для привязки пространства-времени стал насущным и необходимым.

Для привязки к пространству лунной поверхности предлагается установить ключевой селенодезический участок с несколькими пространственно-геодезическими дисплеями, такими как астрономия, лунная лазерная локация (LLR), космическая геодезия, радиомаяки и GNSS для построения лунной динамической системы отсчета или эфемериды и лунная фиксированная система отсчета [9].

В то же время для реализации местного стандарта времени в лунном пространстве в качестве эталона времени и частоты

предлагается использовать атомные часы с поддержкой радиосвязи и калибровкой между спутником GNSS и часами на лунной поверхности [14].

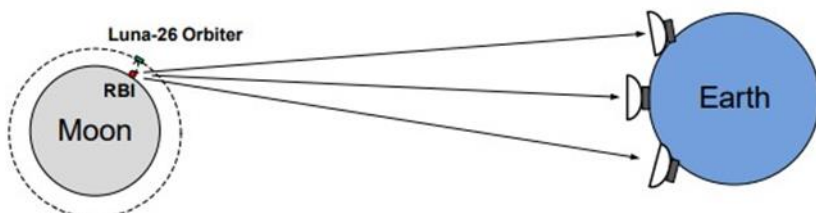


Fig.1 – Navigation measurements for Luna-26 Orbiter and Luna-27 Lander.

Рисунок 2 РСДБ поддержка навигации на Луне [9]

Эта база может быть использована в качестве ключевой станции для обслуживания в лунном пространстве и на поверхности Луны, и соответствующий метод RBI тщательно рассмотрен [15]. Эту лунную систему отсчета можно тесно связать с ITRF и различными ICRF [9]. Простая комбинация радиомаяка S/X-диапазона с транспондером PLL, приемником GNSS, CCR и чипом Rb часов с USO станет новой технологией для предлагаемого аппаратного обеспечения пространственно-временных данных на лунной поверхности.

При сохранении этой базы данных ее можно использовать для изучения эволюции Луны и планет. Наблюдение физической либрации Луны (LPhL) или вращения по долготе и широте, а также колебания лунного полюса играет ключевую роль в изучении внутренней структуры Луны и многослойной динамической эволюции [9].

За последние 50 лет был разработан метод лунной лазерной локации (LLR) путем измерения изменения расстояния между лазерными ретро рефлекторами лунной поверхности и наземными станциями [9].

Большой прогресс достигнут в исследовании двух- и многослойной Луны. LLR и предлагаемые космические методы также могут способствовать проверке общей теории относительности в пространстве Земля-Луна при различных лунных измерениях [1-14].

Европейское космическое агентство

В ноябре 2022 г. представители космических агентств и научно-исследовательских институтов со всех континентов встретились в Европейском центре космических исследований и технологий ЕКА в Нордвейке (Нидерланды). Цель совместных научных обсуждений

заклучалась в поисках оптимальных решений до того момента времени, когда отдельные космические агентства будут принимать собственные решения по селенодезическому обеспечению Луны [14].

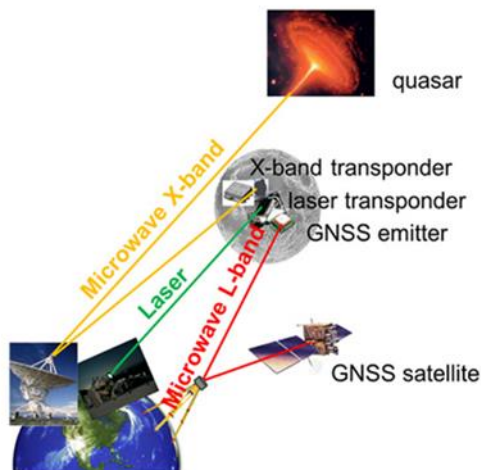


Рисунок 3 Лунное, земное и мировое времена и связи [8]

Определение стандарта времени и частоты — это только часть глобального проекта по практическому и коммерческому освоению ресурсов Луны. ЕКА также находится на переднем крае лунных исследований, внося свой вклад в строительство лунной станции Gateway и космического корабля Orion, предназначенных для полета людей на Луну, а также в разработку своего большого логистического лунного посадочного модуля, известного как Argonaut [15].

В ЕКА разрабатывают новое научно-техническое понятие, как «лунное время», чтобы облегчить частным компаниям установку систем телекоммуникаций на Луне. Единое время отсчёта на Луне также должно способствовать развёртыванию навигационной системы для передвижений по его поверхности.

Поскольку десятки лунных миссий будут работать на поверхности Луны и в ее ближайшем космическом пространстве одновременно они должны будут тесно общаться друг с другом и в целях безопасности координировать свои пространственные перемещения около Луны с высокой точностью независимости от центров управления на Земле, то эта новая лунная эра потребует новых подходов и новых принципиальных решений для лунной навигации и безопасности

астронавтов. Международные космические организации также начали обсуждать проблему оперативного слежения и корректировки течения временем на Луне.

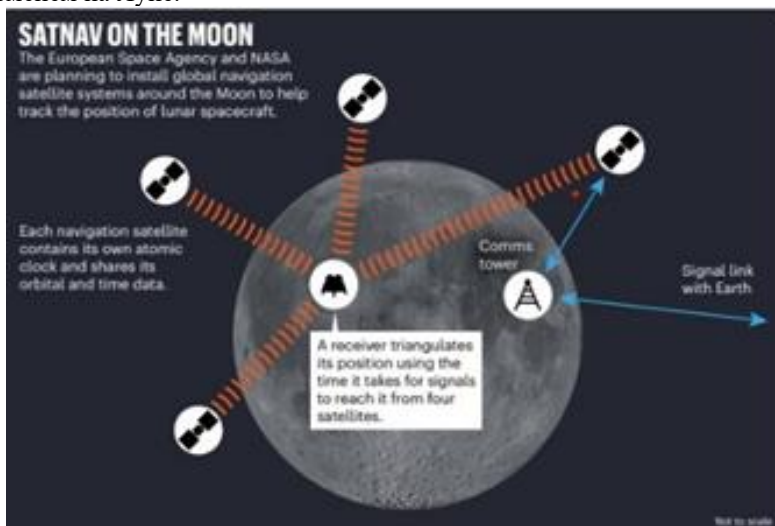


Рисунок 4 Обеспечение лунной навигации [15]

До сих пор каждая новая миссия на Луну выполнялась со своей собственной шкалой времени, экспортируемой с Земли, а антенны для дальнего космоса использовались для синхронизации бортовых хронометров с земным временем, в то же время антенны облегчали двустороннюю связь. Однако этот способ работы не будет надежным и устойчивым для работы при экстремальных лунных условиях.

После завершения строительства станция Gateway будет открыта для пребывающих астронавтов, пополнения запасов посредством регулярных запусков NASA Artemis [15], вплоть до возвращения человека на поверхность Луны, кульминацией которого станет база с экипажем возле южного полюса Луны.

В то же время будут выполняться и многочисленные беспилотные миссии — каждая миссия Artemis сама по себе будет выпускать множество лунных спутников CubeSat — и ЕКА запустит свой большой логистический посадочный модуль Argonaut European Large Logistics Lander. Эти лунные миссии будут не только находиться на Луне или вокруг нее в одно и то же время, но они также часто будут обмениваться информацией друг с другом, потенциально передавая

сообщения между собой, выполняя совместные наблюдения или выполняя операции по сближению лунных зондов.

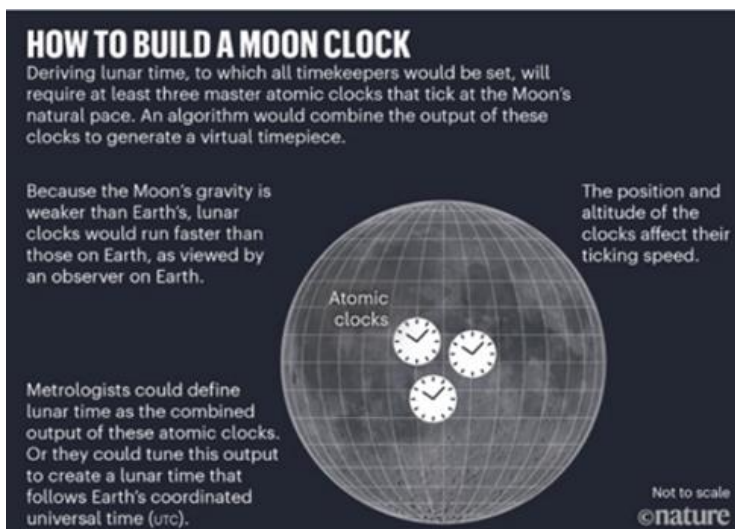


Рисунок 5 Лунное время [15]

Навигация лунных миссий

ЕКА и НАСА совместно разрабатывают платформу под названием LunaNet [15]. В ее основе будет лежать широкий набор правил, предназначенных для того, чтобы все спутниковые навигационные, коммуникационные и вычислительные системы на Луне могли образовывать общую согласованную сеть, подобную Интернету на Земле. LunaNet - это система взаимно согласованных стандартов, протоколов и требований к интерфейсу, позволяющая будущим лунным миссиям работать вместе, концептуально аналогично тому, что делается на Земле для совместного использования GPS и Galileo. А к Moonlight на лунной орбите присоединится эквивалентная служба - Lunar Communications Relay and Navigation System.

Чтобы максимизировать совместимость, эти две системы должны использовать одинаковые шкалы времени, наряду со многими другими миссиями с экипажем или без экипажа, которые они будут поддерживаться с Земли [15]

Ход времени на Земле и Луне

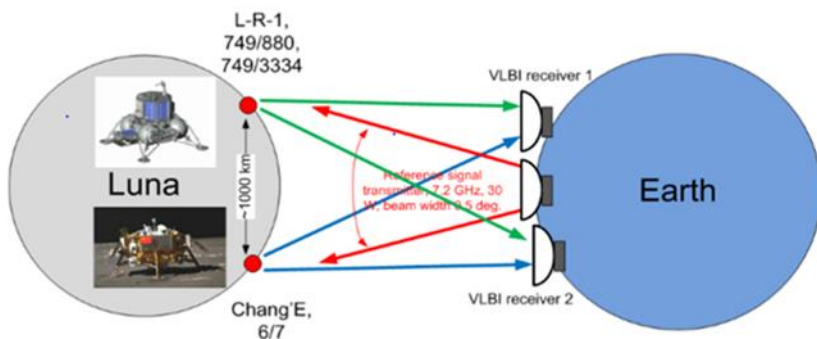


Рисунок 6 Лунное время течет быстрее земного времени!!! [9]

Гравитационные поля Земли и Луны [9] различно влияют на скорость течения времени на них. Спутники GPS, вращающиеся вокруг земного шара на высоте 20 186 км, учитывают тот факт, что их часы идут на 45,7 микросекунды быстрее, чем часы на поверхности Земли, за земные сутки в 24 часа [15].

Гравитация Луны составляет примерно 1/6 от земной гравитации, и поэтому часы на поверхности Луны будут идти быстрее на 56 микросекунд ежедневно чем на поверхности Земли. Чтобы работать на Земле и Луне одновременно, совместно и согласованно, международное сообщество также должно установить общую «селеноцентрическую систему отсчета», аналогичную той роли, которую играет на Земле Международная земная система отсчета, позволяющую последовательно измерять точные расстояния между точками на нашей планете. Правильно настроенные системы отсчета являются важными компонентами современных систем GNSS. Точная навигация требует строгого учета течения времени на Земле, Луне, в космическом пространстве между ними и их отличия. Это связано с тем, что приемники спутниковой навигации определяют свое местоположение, преобразовывая время, за которое несколько спутниковых сигналов достигают его, в расстояния — умножая время на скорость света [9,15].

Навигационные системы на Земле и Луне

Все наземные спутниковые навигационные системы, такие как европейская Galileo или американская GPS, работают по своим собственным системам синхронизации, но при этом они имеют

фиксированные смещения относительно друг друга вплоть до нескольких миллиардных долей секунды, а также относительно системы мирового времени UTC Universal. Замена времени по Гринвичу на UTC является частью нашей повседневной жизни: это время, используемое для Интернета, авиационных стандартов, а также для точных научных экспериментов, поддерживаемых парижским Международным бюро мер и весов (BIPM). BIPM вычисляет UTC на основе входных данных из коллекций атомных часов, поддерживаемых учреждениями по всему миру, включая технический центр ESTEC EKA в Нордвейке, Нидерланды, и центр управления полетами ESOC в Дармштадте, Германия.

Программа объединенной пространственно-временной системы отсчета на Луне

После существенного прогресса человечества в лунном пространстве и на лунной поверхности острый запрос на получение локальных данных лунного пространства для привязки пространства-времени стал насущным и необходимым [14]. За последние 55 лет был разработан метод лунной лазерной локации (ЛЛЛ) путем измерения изменения расстояния между лазерными ретрорефлекторами лунной поверхности и наземными станциями. Большой прогресс достигнут в научных исследованиях моделей многослойной Луны. ЛЛЛ и предлагаемые космические методы также могут способствовать проверке общей теории относительности в пространстве Земля-Луна при различных лунных измерениях.

Для привязки к пространству лунной поверхности предлагается установить ключевой селенодезический участок с несколькими пространственно-геодезическими дисплеями, такими как астрономия, лунная лазерная локация (LLR), космическая геодезия, радиомаяк и GNSS, для построения лунной динамической системы отсчета или эфемериды и лунная фиксированная система отсчета [4].

В то же время для реализации местного стандарта времени в лунном пространстве в качестве эталона времени и частоты предлагается использовать атомные часы с поддержкой радиосвязи и калибровкой между спутником GNSS и часами на лунной поверхности. Эта база может быть использована в качестве ключевой станции для обслуживания PLL в лунном пространстве и на поверхности Луны, соответствующий метод также был тщательно рассмотрен. Эту лунную систему отсчета можно тесно связать с ITRF и различными ICRF.

Простая комбинация радиомаяка S/X-диапазона с транспондером PLL, приемником GNSS, CCR и чипом Rb часов с USO станет зрелой технологией для предлагаемого аппаратного обеспечения пространственно-временных данных на лунной поверхности. При сохранении этой базы данных ее можно использовать для изучения эволюции Луны и планет. Наблюдение физической либрации Луны (LPhL) или вращения по долготе и широте, а также колебания лунного полюса играет ключевую роль в изучении внутренней структуры Луны и ее многослойной динамической эволюции [8,14].

Лунный навигационный альманах

Лунный навигационный альманах необходим для проведения любых наблюдений с поверхности Луны. Альманах должен содержать точную и подробную информацию о положении звезд, Солнца, планет, переходе от лунного времени к всемирному времени и наоборот, программу отправки сигналов времени. Лунная навигация для наблюдений с лунной поверхности требует высокоточных теорий вращения и внутреннего строения Луны [1,4,5,7,8].

Время:

Переход от лунного времени к всемирному времени и обратному.

Программа отправки сигналов времени. Средняя долгота восходящего узла. Физическая либрация по долготе, представленная во времени.

Поправка за неточность истинного тропического времени.

Звезды:

Видимые селеноэкваториальные координаты ярчайшей звезды. Карты полярных областей лунного неба; видимые места полярных звезд.

Высоты и азимуты полярных звезд. Выбор навигационных звезд.

Земля: Селенографические координаты. Моменты восхода и заката Луны. Прохождение точек поверхности Земли через наблюдаемый терминатор.

Заключение

Вблизи любого гравитационного небесного объекта, обладающего массой, «пространство-время искажается, что приводит к искривлению пространства и замедлению времени. В ближайшие несколько лет многие космические агентства отправят на Луну множество спутников. Их цель состоит в том, чтобы использовать эти спутники для создания лунного аналога GPS, так чтобы астронавты и луноходы могли мгновенно и с высокой точностью определять свое местоположение на Луне и в окололунном пространстве. Но для того, чтобы система Lunar GPS работала, лунные спутники должны иметь свое очень точное собственное время.

Литература

1. Petrova N., Gusev A., New Trends in the Development of the Lunar Physical Libration Theory // *Celestial Mechanics & Dynamical Astronomy*, 2001, V. 80, Issue 3/4, P. 215-225. Cited by **17**.
2. Gusev A., Nutations and liquid core of the Moon // *Bulletin of NAOJ*, Mitaka, Tokyo, 2004, No.134, P.13-14 (in Japanese).
3. Barkin, Yu., Gusev, A., Petrova, N., The study of the spin-orbit and inner dynamics of the Moon: Lunar mission applications // 2006, *Advance in Space Research*, V. 37, P. 72-79.
4. Kopeikin S., Pavlis E., Pavlis D., Brumberg V., Efroimsky M, Escape A, Getino J., Gusev A., Muller J., Petrova N., Prospects in the orbital and rotational dynamics of the Moon with the advent of sub-centimeter lunar laser ranging//*Advances in Space Research*, 2008, V.42, P.1378-1390. Cited by **20**.
5. Gusev A., Petrova N., The Moon-2012+: Spin-orbit evolution, geophysics and Selenodesy of the Moon. // *Advances in Space Research*, 2008, V. 42, P. 289–293.
6. Petrova N., Gusev A., Hanada H., Kawano N., Free librations of the two-layer Moon and the possibilities of their detection. // *Advances in Space Research*, 2008, V.42, P.1398-1404. Cited by **30**.
7. Китиашвили И. Н., Гусев А. В., Вращательная эволюция планетных систем под действием гравитационных и магнитных возмущений // *Космические исследования*, 2010, Наука, Т.48, N.4, С.335-345.
8. Dehant V., J. Oberst, R. Nadalini, U. Schreiber, N. Rambaux., Geodesy instrument package on the Moon for improving our knowledge of the Moon and the realization of reference frames. // *Planetary and Space Science*. 2012, V. 68, P. 94–104
9. Gusev A.V, Hanada H., Petrova N., Rotation, physical librations and interior structure of the active and multi-layer Moon // 2015, Monograph, Kazan University Publishing Co., Kazan, 328pp. (Russian+English).
10. Meng J.G, Yang G., Ping J.S., Cai Zh., Gusev A., Osei E., Influence of (FeO+TiO₂) Abundance on the Microwave Thermal Emissions of Lunar Regolith // *Science, China Earth Sciences*, 2016, V.59, Issue 7, P. 1498–1507. doi: [10.1007/s11430-016-5280-1](https://doi.org/10.1007/s11430-016-5280-1). Cited by **37**.
11. Hanada H., S.Tsuruta, K.Asari, H.Araki, H.Noda, S.Tazawa, S.Kashima, K.Funazaki, A.Satoh, H.Taniguchi, H.Kato, M.Kikuchi, H.Sasaki, T. Hasegawa, T.Yano, N.Gouda, Y.Kobayashi, A. Gusev., Development of a Small Telescope like PZT and Results of Experiments on the Ground // *Gyroscopy and Navigation*, 2017, V.8(4), P. 304-319.

12. Tang T, Meng Z.G, Lian Y, Wei Xh, Dong X, Wang Y, Cai Zh, Zhang X.P., Gusev A.V., Zhang Y.Z., Extracting Mare-like Cryptomare Deposits in Cryptomare Regions Based on CE-2 MRM Data Using SVM Method // Remote Sensing, 2023, V.15, N.2010. <https://doi.org/10.3390/rs15082010>.
13. Meng Z.G, Tang T.Q, Dong X.G, Gusev A.V. Analyzing the microwave thermal emission features of lunar regolith in Chang'E landing sites and its geologic significance. // SCIENTIA SINICA Physica, Mechanica & Astronomica, 2023, V. 53, Issue 3, 239609, P.1-17. (in Chinese).
14. Гусев А.В., Менг Ж., Пинг Цз., Геологическое освоение Луны IV: Вода и загадка теплового бюджета ранней Луны // Труды 57-ых Научных чтений памяти К. Э. Циолковского. РАН - РАКЦ. Секция «Современные проблемы ракетной и космической техники», (г. Калуга, 20-22 сентября 2022г), 2023, Казань, РИЦ «Школа», с.233-248.
15. Telling the time on the Moon. // ESA article, Feb 27, 2023, https://www.esa.int/Applications/Navigation/Telling_time_on_the_Moon
16. Meng Z., Hanning Sun H., Gusev A.V. et al., Thermophysical properties of surface deposits in **Tsiolkovski crater** and its geologic significance revealed by CE-2 MRM data. Icarus, V. 408, 15 January 2024, P. 115808 Available online 20 Sept 2023. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2023.115808>