

Лазерная локация Луны. 40 лет исследований

Ю.Л.Кокурин

Изложена история зарождения и развития лазерной локации Луны. Приведены основные результаты лазерной локации Луны и перечислены фундаментальные проблемы, решаемые с ее помощью.

Ключевые слова: лазерная локация Луны, релятивистские и гравитационные эффекты, применения в астрометрии, геодезии, геодинاميке, геофизике.

В 1962 г. Николай Геннадиевич Басов предложил группе сотрудников Крымской научной станции ФИАНа (пос. Кацивели) использовать рубиновый лазер, разработанный в ФИАНе, для лазерной локации Луны. Уже в следующем году на телескопе ЗТШ-2.6 была смонтирована лазерно-локационная аппаратура, с помощью которой были зарегистрированы отраженные Луной лазерные сигналы [1]. Работа была выполнена совместными усилиями сотрудников ФИАНа и Крымской астрофизической обсерватории (КрАО). Хронологически этот опыт был вторым, первый провели в США годом раньше [2]. Указанные эксперименты положили начало новому направлению исследований – лазерной локации космических объектов. Хотя они несколько различались по технической реализации, в обоих использовались рубиновые лазеры в режиме свободной генерации с длительностью импульса порядка 1–2 мс, что соответствовало ошибке в определении расстояния до Луны ~ 150–300 км, поэтому задача измерения расстояний не ставилась. Цель этих экспериментов заключалась в подтверждении практической возможности лазерной локации Луны.

Первые измерения расстояний до Луны, имевшие определенную практическую ценность, были выполнены в 1965 г. [3]. В них уже использовался лазер с длительностью импульса $\sim 5 \times 10^{-8}$ с (ошибка 7.5 м). Однако реальная ошибка в расстоянии определялась не параметрами аппаратуры, а «глубиной» лоцируемого объекта, т. е. неровностями рельефа Луны в пределах освещаемой площадки и ее наклоном по отношению к лучу лазера, и составляла примерно 200 м. Этот результат уже можно было использовать для оценки точности эфемерид Луны (точность в топоцентрическом расстоянии до поверхности Луны к тому времени была доведена до 3 км).

Первые же простые оценки [4] показали, что лазерные измерения расстояний до Луны позволят существенно уточнить основные параметры системы Земля–Луна и, таким образом, значительно продвинуться в решении многих задач селенодезии, астрометрии, геофизики. Из этих и последующих оценок [5, 6] следует, что для этого не-

обходимо измерять расстояния до Луны с высокой точностью. Преимущества лазерно-локационных измерений начинают проявляться при ошибках в несколько метров: основные параметры системы Земля–Луна определяются с точностью, которая на порядок и более превышает точность, достигаемую с использованием классических угломерных методов. Для получения таких результатов необходимо было локализовать точки отражения на Луне, т. е. установить на ней малые мишени, эффективно отражающие свет в направлении на наблюдателя. В 1969–1973 гг. на Луну были доставлены пять таких мишеней (угловых светоотражателей): три американских – экспедициями «Аполлон-11», «Аполлон-14», «Аполлон-15», и две французских, установленных на советских самоходных аппаратах «Луноход-1» и «Луноход-2». В рамках подготовки к работе с угловыми отражателями в ряде стран создавалась новая лазерно-локационная аппаратура.

В 1969 г. в обсерватории Макдональд (США) с помощью телескопа диаметром 2.7 м были начаты регулярные измерения расстояний до лунных светоотражателей. Первоначальная погрешность составляла ~ 3 м, а к 1972 г. она была уменьшена до ~ 15 см. В период с 1984 по 1987 гг. работы по лазерной локации были постепенно переведены на специально созданную станцию MLRS, оборудованную телескопом диаметром 0.76 м [7, 8]. При этом рубиновый лазер был заменен лазером на кристаллах YAG. Эта станция сейчас проводит регулярные измерения расстояний до Луны и до геодинамических искусственных спутников Земли (ИСЗ) с высокими орбитами. Погрешность измерений к настоящему времени доведена до 1–3 см. За почти 30 лет в обсерватории Макдональд накоплены ряды наблюдений, содержащие более 6000 нормальных точек. В других обсерваториях США, в которых начинались работы в области лазерной локации Луны (обсерватория AFCRL, обсерватория Гарвардского университета), эти проекты были по разным причинам прекращены. В обсерватории Халеакала Гавайского университета (о. Мауи) в конце 1980-х гг. был проведен небольшой цикл измерений.

Во Франции подготовка к лазерным наблюдениям Луны длительное время проводилась в обсерватории Пик-дю-Миди, где для этих целей строился многоэлементный телескоп диаметром 6 м. Довести его пара-

Крымская лазерная обсерватория, Украина, Крым, 98688 Кацивели, ул. Шулейкина, 13

Поступила в редакцию 15 июля 2002 г.

метры до проектных не удалось, и в конце 1970-х гг. работы по лазерной локации Луны были перебазированы во вновь построенную геодинимическую обсерваторию CERGA на Лазурном берегу, где в 1983 г. начались регулярные лазерные наблюдения лунных мишеней («Аполлон-11», «Аполлон-14», «Аполлон-15» и «Луноход-2») [9]. Сегодня погрешность измерений составляет 1–2 см, и ведутся работы по снижению ошибки до субсантиметрового уровня. Число нормальных точек, полученных этой обсерваторией с 1983 г., превысило 8000.

В СССР измерения расстояний до лунных светотражателей были начаты в КрАО в 1969 г., однако регулярный характер они приобрели спустя четыре года, когда был введен в действие автоматизированный лазерно-локационный комплекс с погрешностью измерений до 0,9 м. К 1978 г. была построена новая модель лазерного локатора с ошибкой единичного измерения ~ 25 см. Всего в КрАО было проведено около 1400 единичных измерений расстояний, в основном до двух отражателей («Луноход-2» и «Аполлон-15») [10]. С 1983 г. эти работы прекратились в связи с закрытием в стране лунных космических программ.

Параллельно с работами по наблюдению Луны с использованием телескопа ЗТШ-2.6 в ФИАНе были созданы пять транспортабельных станций с телескопами диаметром 1 м для лазерной локации ИСЗ. Одна из них предназначалась для локации как ИСЗ, так и Луны. Однако довести ее до уровня, необходимого для локации Луны, не удалось, и сейчас она используется для регулярных наблюдений ИСЗ с орбитами до 40 000 км. Еще три станции этой серии проводят регулярные наблюдения низкоорбитальных и геодинимических ИСЗ.

В настоящее время заканчивается создание лазерно-локационной станции в Италии (г. Матера). В ней применен лазер с синхронизацией мод, длительность импульса которого составляет 50 пс, а энергия – 100 мДж. Успешные пробные наблюдения на станции были проведены в 1998 г.

В 1960–70-х гг. попытки осуществить лазерную локацию Луны предпринимались в Японии (обсерватория Окаяма), однако они оказались безуспешными и были постепенно прекращены.

Аналогичная ситуация сложилась и в Австралии (обсерватория Орорал), куда в 1972 г. для постановки этой работы из США был перебазирован 1,5-метровый телескоп обсерватории AFCRL. Однако многолетние усилия по осуществлению лазерной локации Луны в этой обсерватории не дали ощутимых результатов.

В Германии (г. Ветцель) построена многоцелевая геодинимическая обсерватория, одной из задач которой является лазерная локация Луны. Однако здесь проводились лишь отдельные пробные измерения, регулярных наблюдений Луны эта обсерватория не осуществляет.

Китай также планирует создать аппаратуру для лазерной локации Луны, но работы в этом направлении находятся в начальной стадии.

Необходимо отметить, что осуществление лазерно-локационных измерений расстояний до Луны с высокой точностью представляет собой сложнейшую научно-техническую задачу. Достаточно сказать, что уровень отраженного сигнала в точке приема при реально доступных параметрах лазерно-локационной аппаратуры составляет десятые доли фотона на один импульс лазера. Регистрация такого сигнала с точной (10^{-6} – 10^{-7} с) при-

вязкой к шкале всемирного времени при наличии паразитных засветок требует применения статистического накопления сигнала в сочетании с эффективным спектральным и пространственно-временным селективированием. Поэтому лунная лазерно-локационная система представляет собой уникальный комплекс, создание которого доступно только высокоразвитым странам, обладающим наиболее современными технологиями.

Итак, в то время как на Луне создана сеть лазерных мишеней, пригодная для исследований в области астрометрии, селенодезии и физики Луны, на Земле только две обсерватории проводят регулярные измерения расстояний до этих мишеней, что несколько ограничивает возможности применения метода для исследования проблем, связанных с Землей. Создание по крайней мере еще одного пункта наблюдений существенно расширило бы эти возможности.

Одновременно с экспериментами проводится дальнейшая разработка методов решения широкого круга проблем на основе данных лазерной локации Луны. К ним относятся проблемы геодезии, геодинимики, геофизики, астрометрии, селенодезии, физики Луны, релятивистских теорий, теорий гравитации.

Анализ результатов лазерной локации Луны проводится, в основном, в США (Техасский университет, Лаборатория реактивного движения JPL Калифорнийского технологического института) и во Франции (Парижская обсерватория).

Рассмотрим кратко результаты, полученные на базе лазерно-локационных наблюдений Луны.

Геодезия, геодинимика, геофизика. Первой иллюстрацией возможностей лазерной локации Луны явилось определение хорды, соединяющей обсерваторию Макдональд и Крымскую астрофизическую обсерваторию, проведенное в 1975 г. Ошибка в длине хорды составила первоначально около 2 м, а впоследствии была уменьшена до 0,6 м. [11]. В настоящее время геоцентрические координаты пунктов наблюдений определяются с погрешностью ~ 1 – 2 см.

Как уже упоминалось, сейчас имеются только два пункта (SERGA и MLRS), где проводятся регулярные лазерно-локационные исследования Луны. Этого недостаточно для проведения масштабных геодезических и геодинимических работ. В частности, возможности исследования тектонических явлений – деформаций земной коры и дрейфа континентов – весьма ограничены. Тем не менее лазерная локация Луны позволила исследовать замедление вращения Земли, вызванное лунными приливами, внести коррективы в параметры прецессии и нутации Земли, уточнить главные моменты ее инерции. В области геодинимики лазерная локация Луны используется, в основном, для определения параметров вращения Земли: длительность суток определяется с погрешностью до 0,1–0,2 мс, а координаты полюса – с ошибкой 2–3 см. Эти результаты пополняют базу данных Международной службы вращения Земли (IERS).

Астрометрия, селенодезия, физика Луны. Одним из самых важных применений лазерной локации Луны является построение новых, все более совершенных математических моделей системы Земля–Луна, создание точных эфемерид Луны. Эти исследования проводятся в рамках более общей модели (модели Солнечной системы) с учетом взаимного влияния Солнца, Земли, Луны, планет и крупных астероидов. В настоящее время

топоцентрические расстояния до угловых отражателей на Луне предвычисляются с погрешностью 10–40 см. Основные параметры системы Земля–Луна определяются по данным лазерной локации на несколько порядков точнее, чем с помощью классических угломерных измерений. Например, средний радиус лунной орбиты уточнен более чем на четыре порядка, взаимная ориентация плоскостей земного экватора, лунной орбиты и эклиптики – на два порядка и т. д. На основании измерения движения барицентра системы Земля–Луна вокруг Солнца определено с большой точностью ($\sim 10^{-8}$) отношение массы этой системы к массе Солнца [12].

Исследовано приливное ускорение орбитального движения Луны, приводящее к увеличению радиуса лунной орбиты на 3.8 см в год.

По результатам лазерной локации Луны определены селеноцентрические координаты угловых отражателей, что легло в основу лунной картографии [13]. Значительно точнее, чем классическими методами, исследовано собственное вращение Луны (физическая и свободная либрация), ее приливные деформации, гравитационное поле. Определены моменты инерции Луны относительно главных осей. Все эти данные используются для создания модели внутреннего строения Луны. Анализ распределения масс внутри Луны указывает на наличие жидкого ядра, радиус которого оценивается приблизительно в 350 км [14].

Релятивистские и гравитационные эффекты. Лазерная локация Луны с успехом используется для проверки справедливости теории относительности и теории гравитации для тел Солнечной системы. Отметим наиболее важные результаты. Нарушение принципа эквивалентности гравитационной и инертной масс должно приводить к смещению орбиты Луны по направлению к Солнцу на величину $\Delta r = 12.8\eta \cos(\omega t)$, где ω – орбитальная скорость Луны; Δr измеряется в метрах [15]. Анализ результатов лазерной локации Луны дал значение параметра Нордверта $\eta \leq 10^{-3}$. Этому соответствует отклонение отношения гравитационной и инертной масс от единицы, составляющее порядка 3×10^{-13} , что с большой точностью подтверждает справедливость принципа эквивалентности для тел космических масштабов. Исследования орбитального движения Луны позволили установить, что вековое уменьшение гравитационной постоян-

ной $G^{-1}(dG/dt)$ не превышает 10^{-11} в год [16]. Исследована также релятивистская (геодезическая) прецессия лунной орбиты, связанная с движением Земли и Луны вокруг Солнца. В соответствии с общей теорией относительности ее значение (угловая скорость движения узлов лунной орбиты) составляет 19×10^{-3} угловых секунд в год; наблюдаемое значение соответствует теоретическому с точностью около 2 %.

Уже из этого неполного перечня проблем, а также из результатов, достигнутых при их решении, можно сделать вывод о том, что лазерная локация Луны, начало которой было положено простыми опытами 40 лет назад, превратилась в эффективный современный метод исследований, используемый в различных областях науки.

Лазерная локация Луны – не единственная область применения лазеров для космических исследований. Для решения многих из перечисленных выше проблем широко используется лазерная локация ИСЗ. Однако эта тема выходит за рамки настоящей статьи.

1. Грасюк А.З. и др. *ДАН СССР*, **154**, 1303 (1964).
2. Smullin L.D., Fiocco G. *Proc. IRE*, **50**, 1703 (1962).
3. Кокурин Ю.Л., Курбасов В.В., Лобанов В.Ф., Можжерин В.М., Сухановский А.Н., Черных Н.С. *Письма в ЖЭТФ*, **3**, 219 (1966).
4. Кокурин Ю.Л., Курбасов В.В., Лобанов В.Ф., Можжерин В.М., Сухановский А.Н., Черных Н.С. *Космические исследования*, **IV**, № 3, 414 (1966).
5. Абалакин В.К., Кокурин Ю.Л. *УФН*, **134**, № 3, 526 (1981).
6. Mulholland J.D. *Reviews of Geophysics and Space Physics*, **18**, № 3, 549 (1980).
7. Shelus P.J. *X International Laser Workshop* (Shanghai, 1996, v. 2, p. 183, p. 185).
8. Shelus P.J., Ricklefs R.L., Wipple A.L., Wiant J.R. *AGU Geodynamic Series*, **25**, 183 (1993).
9. Veillet C., Mangin J.F., Chabaudie J.E., Dumalin C., Ferraudy D., Torre J.M. *AGU Geodynamic Series*, **25**, 189 (1993).
10. Кокурин Ю.Л., Курбасов В.В., Лобанов В.Ф., Сухановский А.Н. *Препринт ФИАН № 127* (М., 1974).
11. Calame O. *Compt. Rend. B*, **280**, 551 (1975).
12. Shelus P.J., Ries J.G., Williams J.G., Dickey J.O. *XII International Laser Workshop* (Matera, 2000).
13. Davies M.E., Colvin T.R., Meyer D.L. *J. Geophys. Res. B*, **13**, 92, 14177 (1987).
14. Williams J.D., Dickey J.O. *ILRS Annual Report*, 208 (1999).
15. Nordvedt K. *Phys. Rev.*, **170**, 1186 (1968).
16. Williams J.D., Newhall X.X., Dickey J.O. *Phys. Rev. D*, **53**, 6370 (1996).