

Методика радиолокационного картирования Луны

© С. Р. Павлов, Ю. С. Бондаренко, Д. А. Маршалов

ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

Реферат

Радиолокация является одним из наиболее эффективных методов наземного дистанционного исследования Луны, который позволяет получать изображения ее поверхности с пространственным разрешением, не достижимым для наземных средств измерений на других длинах волн. Этот метод заключается в освещении Луны радиолокационным сигналом, приеме отраженного сигнала (эхо-сигнала) и анализе его характеристик. При этом разрешающая способность радиолокационной системы не зависит от земной атмосферы и расстояния до цели, а задаётся характеристиками излучаемого сигнала. Радиолокационное изображение формируется в системе координат, связывающей доплеровский сдвиг по частоте с задержкой прихода эхо-сигнала, возникающих в результате движения передающей и приемной антенных систем относительно цели. Для практического использования получаемых таким образом изображений необходимо осуществить привязку радиолокационных изображений к селенографическим координатам.

В данной работе предложен численный метод преобразования временной задержки и частоты эхо-сигнала к селенографической широте и долготе. Значения широты и долготы в любой точке радиолокационного изображения вычисляются на сетке узлов интерполяцией плоскостями, которые строятся по трем соседним узлам, образующим треугольники. Триангуляция сетки узлов выполняется с помощью метода Делоне таким образом, чтобы отклонение интерполируемых значений в пределах треугольников было минимальным.

Методика была применена к радиолокационному изображению района кратера Тихо на длине волны 4.2 см. Полученная в результате радиолокационная карта охватывает область на поверхности Луны протяженностью ~ 30° по долготе и 25° по широте, что соответствует размерам 600 × 600 км со средним пространственным разрешением в 120 м. В работе выполнена оценка точности полученной карты и проведено ее сравнение с оптическим изображением. Радиолокационные карты высокого разрешения лунной поверхности, полученные с использованием предложенного в работе метода, могут быть полезны для изучения геологической истории Луны, разведки и добычи полезных ископаемых, выбора безопасных посадочных площадок, особенно в связи с возросшим на сегодняшний день интересом многих стран к освоению Луны.

Ключевые слова: Луна, радиолокационное картирование, метод преобразования координат.

Контакты для связи: Павлов Сергей Романович (sr.pavlov@iaaras.ru).

Для цитирования: Павлов С. Р., Бондаренко Ю. С., Маршалов Д. А. Методика радиолокационного картирования Луны // Труды ИПА РАН. 2023. Вып. 67. С. 3–7.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.67.3-7>

Lunar Radar Mapping Technique

S. R. Pavlov, Yu. S. Bondarenko, D. A. Marshalov

Institute of Applied Astronomy of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, Russia

Abstract

Radar is one of the most effective methods of ground-based remote study of the Moon, allowing one to obtain images of its surface with a spatial resolution that is not achievable by ground-based measuring instruments at other wavelengths. This method consists of illuminating the Moon with a radar signal, receiving the reflected signal (echo) and analyzing its characteristics. At the same time, the resolution of the radar system does not depend on the earth's atmosphere and the distance to the target but is determined by the characteristics of the transmitted signal. The radar image is formed in a coordinate system that relates the Doppler frequency shift to the delay in arrival of the echo signal resulting from the movement of the transmitting and receiving antenna systems relative to the target. For the practical use of images obtained in this way, it is necessary to link radar images to selenographic coordinates.

This paper proposes a numerical method for converting time delay and frequency of the echo to selenographic latitude and longitude. The values of latitude and longitude at any point in the radar image are calculated on a grid of nodes by interpolation with planes, which are constructed from three adjacent nodes forming triangles. Triangulation of the node grid is performed using the Delaunay method, so that the deviation of the interpolated values within the triangles is minimal.

The technique was applied to a radar image of the Tycho crater region at a wavelength of 4.2 cm. The resulting radar map covers an area on the lunar surface approximately 30 degrees in longitude and 25 degrees in latitude, corresponding to 600 by 600 km with an average spatial resolution of 120 m. The paper evaluates the accuracy of the resulting map and

compares it with the optical image. High-resolution radar maps of the lunar surface obtained using the method proposed in this work can be useful for studying the geological history of the Moon, exploration and mining of minerals, and selection of safe landing sites, especially in connection with the increased interest of many countries in the exploration of the Moon.

Keywords: Moon, radar mapping, coordinate transformation.

Contacts: Sergei R. Pavlov (sr.pavlov@iaaras.ru).

For citation: Pavlov S. R., Bondarenko Yu. S., Marshalov D. A. Lunar radar mapping technique // Transactions of IAA RAS. 2023. Vol. 67. P. 3–7.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.67.3-7>

Введение

Радиолокация является одним из наиболее эффективных методов наземного дистанционного исследования Луны и позволяет получать изображения ее поверхности с пространственным разрешением, не достижимым для наземных средств измерений на других длинах волн. Этот метод заключается в освещении Луны радиолокационным сигналом, приеме отраженного сигнала (эхо-сигнала) и анализе его характеристик. При этом разрешающая способность радиолокационной системы не зависит от земной атмосферы и расстояния до цели, а задаётся характеристиками излучаемого сигнала. Радиолокационное изображение формируется в системе координат, связывающей доплеровский сдвиг по частоте с задержкой прихода эхо-сигнала, возникающих в результате движения передающей и приемной антенных систем относительно цели ([Pettengill, 1960](#)). Для практического использования получаемых таким образом изображений необходимо осуществить привязку радиолокационных изображений к селенографическим координатам.

Преобразование временной задержки и частоты эхо-сигнала к селенографической широте и долготе проводится при помощи аналитического метода, основанного на геометрической связи этих величин, выраженной через видимые координаты ближайшей к приемнику точки, движущейся по сферической поверхности Луны ([Pettengill et al., 1974](#)). Это единственный описанный в литературе метод, применявшийся для получения радиолокационных карт Луны ([Campbell et al., 2007](#); [Campbell et al., 2010](#)).

В данной работе предложен численный метод привязки радиолокационных изображений к селенографическим координатам. Этот метод был применен к радиолокационному изображению района кратера Тихо на длине волны 4.2 см с пространственным разрешением порядка 120 м. Выполнена оценка точности полученной карты, и проведено ее сравнение с оптическим изображением.

Определение селенографических координат по радиолокационному изображению

Современные численные эфемериды планет позволяют определять положения целей на по-

верхности Луны относительно Земли с дециметровой точностью ([Питъева и др., 2019](#)). Каждую такую цель с селенографическими координатами λ_i, θ_i и высотой h_i можно однозначно сопоставить с доплеровским сдвигом по частоте f_i и задержкой эхо-сигнала τ_i для заданного расположения приёмной и передающей антенных систем на Земле. Эти значения рассчитываются с выбранным шагом и далее формируется сетка «узлов». Таким образом, каждому узлу сетки на радиолокационном изображении в пространстве «Доплер – задержка» будет соответствовать узел в пространстве «долгота – широта». Для получения значений долготы и широты в любой точке радиоизображения, отличной от узлов, необходимо выполнить интерполяцию функций $\lambda(f, \tau)$ и $\theta(f, \tau)$. Билинейная интерполяция полиномами в данном случае не применима, поскольку сетка в пространстве «Доплер – задержка» нерегулярна ([Калиткин, 1978](#)). Поэтому проводится интерполяция плоскостями, которые строятся по трем соседним узлам, образующим треугольники. Триангуляция сетки узлов выполняется в пространстве «долгота – широта» с помощью метода Делоне ([Скворцов и др., 2006](#)) таким образом, чтобы отклонение интерполированных значений λ и θ в пределах треугольников было минимальным.

Решая две системы уравнений для каждого i -го треугольника в пространстве «Доплер – задержка», с координатами вершин $(f_{A_i}, \tau_{A_i}), (f_{B_i}, \tau_{B_i}), (f_{C_i}, \tau_{C_i})$ находятся два набора коэффициентов $a_{\lambda_i}, b_{\lambda_i}, c_{\lambda_i}$ и $a_{\theta_i}, b_{\theta_i}, c_{\theta_i}$, задающих плоскости, аппроксимирующие значения долготы и широты в пределах треугольника:

$$\begin{cases} a_{\lambda_i} f_{A_i} + b_{\lambda_i} \tau_{A_i} + c_{\lambda_i} = \lambda_{A_i}; \\ a_{\lambda_i} f_{B_i} + b_{\lambda_i} \tau_{B_i} + c_{\lambda_i} = \lambda_{B_i}; \\ a_{\lambda_i} f_{C_i} + b_{\lambda_i} \tau_{C_i} + c_{\lambda_i} = \lambda_{C_i}, \end{cases} \quad \begin{cases} a_{\theta_i} f_{A_i} + b_{\theta_i} \tau_{A_i} + c_{\theta_i} = \theta_{A_i}; \\ a_{\theta_i} f_{B_i} + b_{\theta_i} \tau_{B_i} + c_{\theta_i} = \theta_{B_i}; \\ a_{\theta_i} f_{C_i} + b_{\theta_i} \tau_{C_i} + c_{\theta_i} = \theta_{C_i}. \end{cases}$$

Тогда значения долготы $\lambda(f, \tau)$ и широты $\theta(f, \tau)$ внутри i -го треугольника будут определяться как:

$$\lambda = a_{\lambda_i} f + b_{\lambda_i} \tau + c_{\lambda_i}$$

$$\theta = a_{\theta_i} f + b_{\theta_i} \tau + c_{\theta_i}.$$

Хочется отметить, что одним и тем же значениям доплеровского сдвига по частоте и задержки эхо-сигнала на радиолокационном изображении могут соответствовать разные координаты на по-

верхности Луны из-за разности высот h_i в этих точках. В данной работе h_i считалась равной среднему радиусу Луны, поскольку для учета высот при определении f_i и τ_i , необходимо иметь точную цифровую модель рельефа с разрешением, сопоставимым с радиолокационным изображением, которая на данный момент недоступна.

Радиолокационная карта района кратера Тихо

Радиолокационные наблюдения кратера Тихо проводились 7 сентября 2021 г. с использованием 35-метровой антенны «DSA 3» Европейской сети слежения за космическим пространством (ESTRACK), расположенной на станции Маларгуэ в Аргентине, и 13.2-метрового радиотелескопа «РТ-13» российской РСДБ-сети «Квазар-КВО» в обсерватории «Светлое» в бистатической конфигурации. При этом антенна «DSA 3» облучала поверхность Луны сигналом на частоте 7190 МГц (длина волны 4.2 см), а радиотелескоп «РТ-13» регистрировал эхо-сигналы. Излучаемый сигнал модулировался двоичной фазовой манипуляцией в соответствии с повторяющейся псевдослучайной последовательностью длиной 16383 элементов с периодом повторения 8.2 мс, что соответствует пространственному разрешению радиолокационного изображения порядка 120 м.

На рис. 1а представлено полученное радиолокационное изображение в системе координат «частота эхо-сигнала – временная задержка» с центром, соответствующим селенографическим координатам 11.4 з.д. и 43.3 ю.ш. Размеры изображения составляют порядка 6 мс по задержке и около 20 Гц по частоте. На рисунке отчетливо видна

сферическая поверхность Луны с проекцией диаграммы направленности антенны «DSA 3». Стрелками отмечены основные кратеры в этом районе. Полученное радиолокационное изображение имеет сходство с оптической фотографией, но помимо яркости (мощности), каждая точка несет дополнительную информацию о доплеровской частоте и задержке эхо-сигнала. В результате применения к этим данным предложенной выше методики, с учетом предположения, что высоты h_i равны среднему радиусу Луны, была получена радиолокационная карта района кратера Тихо, привязанная к селенографическим координатам (см. рис. 1б). Карта охватывает область на поверхности Луны протяженностью примерно 30° по долготе и 25° по широте, что соответствует размерам 600 на 600 км со средним пространственным разрешением в 120 м.

Методическая ошибка

Поскольку точные значения селенографических координат λ_i, θ_i известны только в узлах, то методическая ошибка в остальных точках определяется точностью интерполяции. Для полученной радиолокационной карты ошибки рассчитывались как среднеквадратическое отклонение между случайно распределенными по сетке значениями долгот и широт, вычисленными по эфемериде, и значениями, полученными интерполяцией по узлам. На рис. 2 представлено радиолокационное изображение района кратера Тихо с наложенным на него распределением ошибок в ортографической проекции с координатами центра 11.4 з.д. и 43.3 ю.ш. Очевидно, что ошибка определяется выбором шага сетки, и в нашем случае при шаге

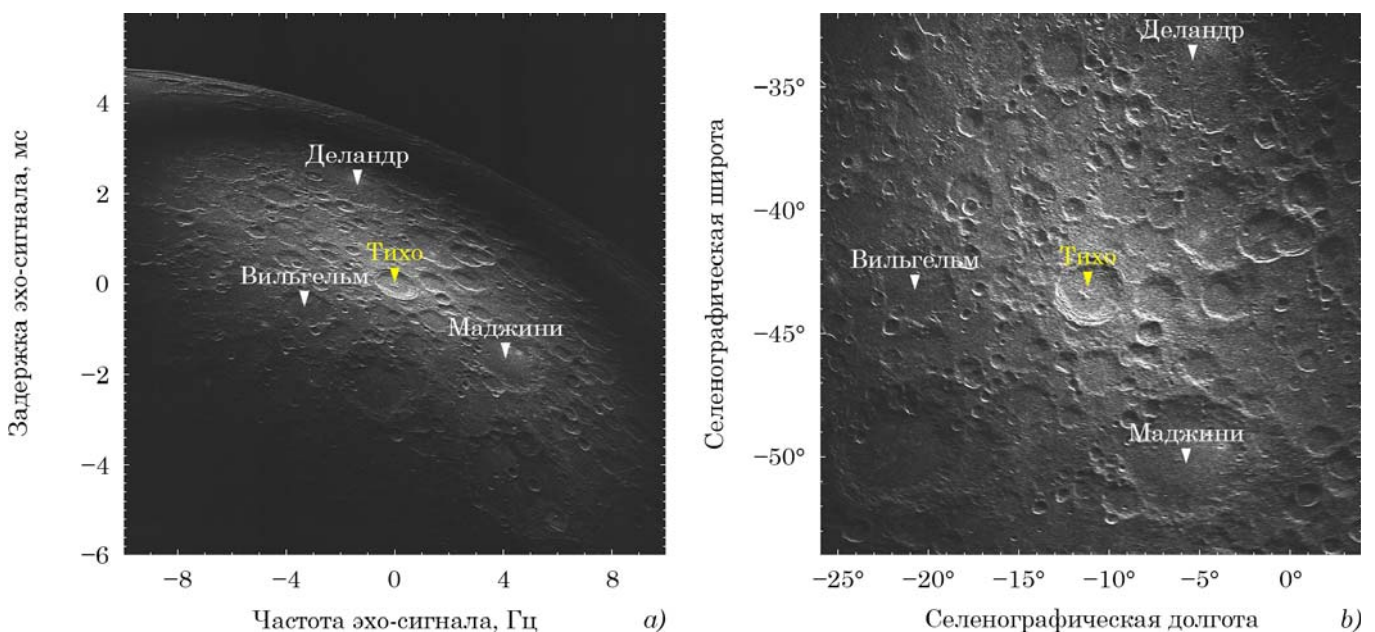


Рис. 1. Радиолокационное изображение района кратера Тихо в системе координат «частота эхо-сигнала – временная задержка» (а) и карта в селенографической системе координат, представленная в цилиндрической проекции (б)

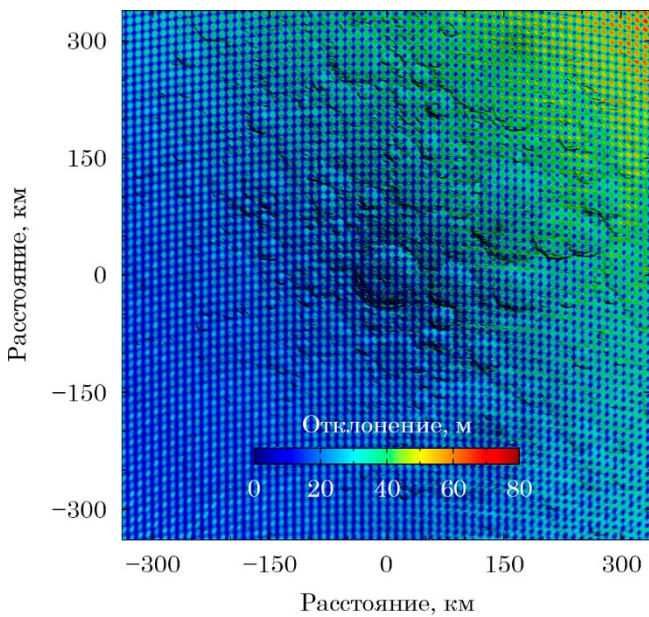


Рис. 2. Радиолокационное изображение района кратера Тихо с наложенным на него распределением ошибок в ортографической проекции

в 0.5° не превышает пространственного разрешения радиолокационного изображения в 120 м. Как видно из рисунка, в центральной части изображения ошибка минимальна, а ближе к краям она доходит до 80 м, что связано с ростом нелинейности преобразования.

Заключение

В данной работе предложена численная методика радиолокационного картирования Луны. Методика была применена к радиолокационному изображению района кратера Тихо на длине волны

4.2 см. Полученная в результате радиолокационная карта охватывает область на поверхности Луны протяженностью примерно 30° по долготе и 25° по широте, что соответствует размерам 600 на 600 км со средним пространственным разрешением в 120 м.

Для сравнения на рис. 3 представлены радиолокационное и оптическое изображения кратера Тихо в селенографической системе координат в цилиндрической проекции. Оптическая мозаика составлена из множества фотографий различного разрешения, полученных камерой LROC (Lunar Reconnaissance Orbiter Camera), расположенной на космическом аппарате LRO (Lunar Reconnaissance Orbiter), на расстояниях от 20 до 150 км от поверхности Луны, а радиолокационное изображение — на расстоянии около 400000 км в течение 5 мин наблюдений. Хотя оба изображения схожи по расположению различных объектов и особенностей на них, они могут взаимно дополнять друг друга информацией о физических свойствах поверхности на разных длинах волн.

Таким образом, радиолокационные карты высокого разрешения лунной поверхности, полученные с использованием предложенного в работе метода, могут быть полезны для изучения геологической истории Луны, разведки и добычи полезных ископаемых, выбора безопасных посадочных площадок, особенно в связи с возросшим на сегодняшний день интересом многих стран к освоению Луны.

Благодарность

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 23-22-00254).

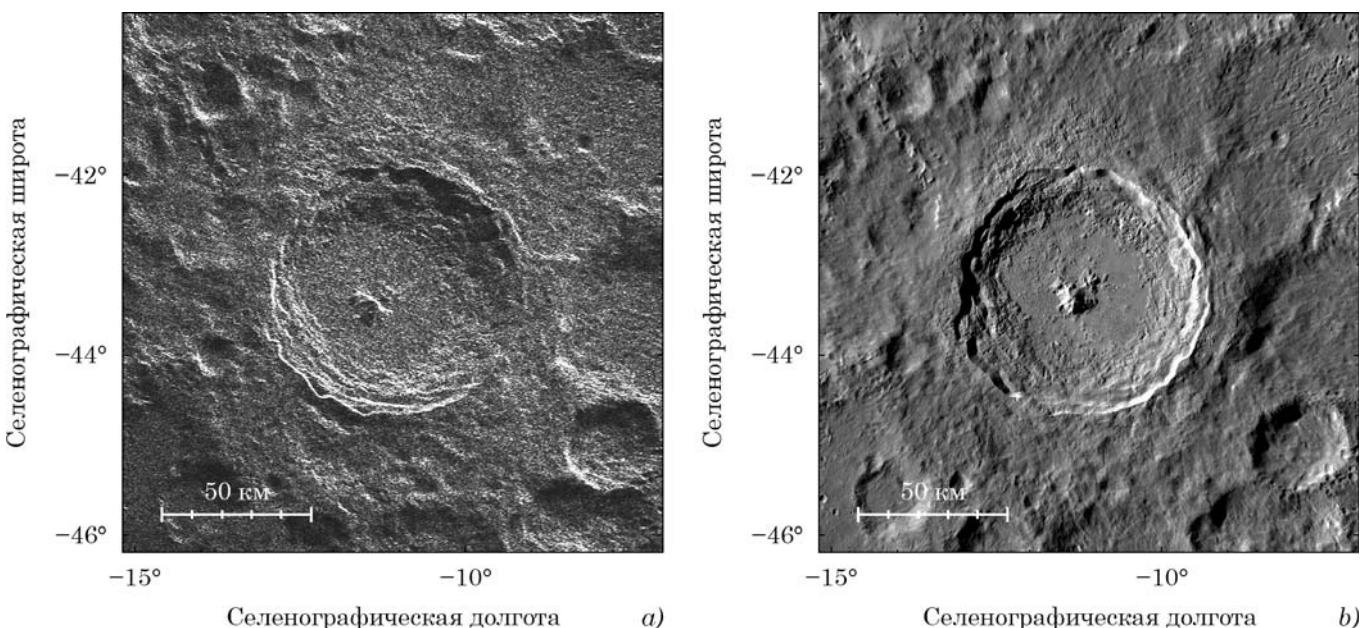


Рис. 3. Радиолокационное изображение кратера Тихо *a)* и мозаика камеры LROC *b)*

Литература

Калиткин Н. Н. Численные методы / ред. Самарского А. А. М.: Наука, 1978. 512 с.

Скворцов А. В., Мирза Н. С. Алгоритмы построения и анализа триангуляции. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2006. 168 с.

Campbell B. A., Campbell D. B., Margot J. L., et al. Focused 70-cm wavelength radar mapping of the Moon // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2007. Vol. 45, no. 12. P. 4032–4042.

Campbell B. A., Carter L. M., Campbell D. B., et al. Earth-based 12.6-cm wave-length radar mapping of the

Moon: New views of impact melt distribution and mare physical properties // Icarus. 2010. Vol. 208, Iss. 2. P. 565–573.

Pettengill G. H., Zisk S. H., Thompson T. W. The mapping of lunar radar scattering characteristics // The Moon. 1974. Vol. 10. P. 3–16.

Pettengill G. H. Measurements of lunar reflectivity using the millstone radar // Proceedings of the IRE. 1960. Vol. 48. P. 933–934.

Pitjeva E., Pavlov D., Aksim D., Kan M. Planetary and lunar ephemeris EPM2021 and its significance for Solar system research // Proceedings of the International Astronomical Union. 2019. 15 (S364). 2019. P. 220–225.