

УДК 537.874.2

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ КООРДИНАТ ЦЕНТРА ОБЛАСТИ ОТРАЖЕНИЯ ПРИ БИСТАТИЧЕСКОЙ РАДИОЛОКАЦИИ ЛУНЫ

О. В. Юшкова<sup>1</sup>, Р. А. Рудаменко<sup>1,2</sup>, В. В. Юшков<sup>1,2</sup>, А. В. Тертышников<sup>1,3</sup>

1- Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова  
РАН, 141190, Московская область, г. Фрязино, пл. академика Введенского, д.1

2-МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет, 119991, Москва, Ленинские горы

3-Институт прикладной геофизики им. Е.К. Федорова,  
127128, Москва, ул. Ростокинская, д.9

Статья поступила в редакцию 19 июня 2018 г.

**Аннотация.** Рассмотрены геометрические аспекты задачи бистатической локации Луны с помощью Иркутского радара некогерентного рассеяния и радиолокационного комплекса РЛК-Л, устанавливаемого на космический аппарат «Луна - 26». Для подготовки программы экспериментов и интерпретации результатов измерений планируется использовать 3-D цифровую модель поверхности Луны. В работе дан вывод формул для определения центра района отражения радиосигналов в координатной системе MOON ME.

**Ключевые слова:** бистатическая радиолокация, координаты, район отражения, Луна, космический аппарат.

**Abstract.** Radio methods are the most simple and informative for remote studies of celestial bodies. Bistatic sounding of the Moon is planned in the mission of "LUNA-RESURS". For experiments radio device RLK-L will be installed on the orbiter "LUNA-26". Bistatic sounding of the Moon is aimed at researching the structure and dielectric properties of the upper layer of the Moon. The rocks permittivity is connected with mineralogical composition of the grounds and its structure depends on the history of formation. For bistatic measurements RLK-L will use the frequency range from 175 MHz to 225 MHz. The thickness of top cover of several meters is available for probing with radio waves of this range. The device RLK-L will work

together with the Irkutsk non-coherent scattering radar of Institute of Solar Terrestrial Physics of Russian Academy of Sciences. For preparing the experiment, predicting and interpreting the results the 3-D model of the lunar surface will be used. In the article, various types of selenographic coordinates are considered. The coordinate system suitable for determining the center of a reflected spot is selected. Formulas for determining coordinates of the center in the MOON ME coordinate system are deduced.

**Key words:** bistatic radar, coordinates, reflected spot, the Moon, spacecraft.

## **Введение**

Исследование Луны – одно из приоритетных направлений космических программ многих стран. Скорость освоения спутника Земли будет зависеть от разнообразия и богатства ресурсов его недр. Одним из дистанционных методов, позволяющих изучить строение и минералогический состав верхнего покрова космических тел, является бистатическая радиолокация. Проводить бистатические исследования грунта Луны можно по схеме «up link», когда сигнал излучается радиопередатчиком, установленным на космическом аппарате (КА), а прием осуществляется на Земле, и по схеме «down link». Для проведения измерений по схеме «down link» на орбите Луны должен находиться радиоприемник, согласованный с наземным передатчиком. Генерация на Земле дает возможность использовать для зондирования радиосигнал большей мощности, которая не ограничена принятыми на КА нормами энергопотребления и требованиями электромагнитной совместимости с чувствительными научными и служебными приборами.

Бистатические исследования Луны по схеме «up link» проводились практически во всех первых лунных миссиях. Схема «down link» была опробована в 2006 г. В качестве передатчика использовался радиокomплекс обсерватории Аресибо, который излучал ЛЧМ сигнал с центральной частотой 2379.2 МГц при девиации 1.6 МГц. Пиковая мощность сигнала соответствовала

200 кВт [1]. Прием и обработка радиосигналов осуществились на КА «Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO)». Аналогичные измерения планируется провести в рамках российской миссии «Луна - Ресурс». Для этого на борт орбитального аппарата «Луна-26» будет установлен радиолокационный комплекс «РЛК-Л» [2]. Работа прибора предусмотрена как в моностатическом, так и в бистатическом режиме при совместной работе с Иркутским радаром некогерентного рассеяния (ИРНР) [3]. При локации предполагается использовать обе схемы.

При интерпретации результатов радиолокации Луны в бистатическом режиме определение области, в которой был сформирован отраженный от поверхности сигнал, является едва ли ни самой большой проблемой. В данной статье представлены формулы для определения координат центра такой области по баллистическим данным КА. Задача рассмотрена в лучевом приближении. Полученные результаты будут использованы для подготовки радиолокационных экспериментов в проекте «Луна-Ресурс».

## **1 Основные параметры РЛК-Л и ИРНР**

Иркутский радар некогерентного рассеяния находится в ведении Института солнечно-земной физики СО РАН. Он представляет собой моностатическую, импульсную радиолокационную станцию с частотным сканированием в направлении Север-Юг в секторе  $\pm 30^\circ$  путем изменения несущей частоты в диапазоне 154 – 162 МГц. Пиковая мощность генерируемого радиосигнала достигает 3.2 МВт, частота следования зондирующих импульсов равна 25 Гц. Длительность зондирующего импульса составляет от 70 до 900 мкс, коэффициент усиления антенны - около 35 дБ.

Радиокомплекс РЛК-Л, устанавливаемый на КА «Луна-26», состоит из двух локаторов: Радар-20 и Радар-200. Прибор предназначен для исследования верхнего слоя грунта в режиме моностатической локации. Первоначально для Радара-20 был выбран частотный диапазон от 17.5 до 22.5 МГц, а для Радара-200 - от 175 до 225 МГц. Затем было принято решение о дополнении

моностатического режима радиолокации Луны бистатическими измерениями. Так как в качестве передатчика планируется использовать ИРНР, для обеспечения совместной работы с наземной аппаратурой частотный рабочий диапазон Радара-200 снижен до полосы 140-180 МГц.

## 2. Геометрия задачи радиолокации Луны в бистатическом режиме

Из электродинамического принципа взаимности следует, что для решения задач бистатической локации грунта в лучевом приближении место установки передатчика - на орбитальном спутнике, как было на первом этапе бистатических исследований, или на Земле, не имеет значения. Поэтому, не ограничивая общности задачи, рассмотрим геометрию радиолокации Луны по схеме «down link». Так как для интерпретации результатов измерений планируется использовать цифровую 3-D модель поверхности Луны, основной системой координат будем считать прямоугольную систему селенографических координат MOON ME (Mean Earth). Эта координатная система (СК) используется для построения цифровой карты поверхности по результатам измерений прибора Lunar Orbiter Laser Altimeter (LOLA), полученных в ходе миссии «Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO, NASA)». В этой системе Луна аппроксимируется сферой радиусом  $R_l$  равным 1737400 м:

$$x^2 + y^2 + z^2 = R_l^2. \quad (1)$$

Центр сферы (1) совпадает с центром системы координат MOON ME и с центром масс Луны. Оси OX и OY лежат в плоскости лунного экватора, при этом первая направлена в начальный меридиан (к Земле), а вторая — к востоку, в сторону Моря Кризисов. Ось OZ расположена вдоль среднего положения оси вращения тела и направлена к северному полюсу. Высота – это значение отклонения точки наблюдения от сферы (1). С трехмерной прямоугольной системой координат XYZ связана сферическая система, в которой положение КА регистрируется тремя координатами:  $H$  - высотой над поверхностью сферы, долготой  $\varphi$ , и широтой  $\theta$ . В сферической системе селенографических координат долгота отсчитывается от нулевого меридиана. Меридианы

нумеруются двумя способами — от  $0^\circ$  до  $360^\circ$  к востоку, либо от  $0^\circ$  до  $+180^\circ$  к востоку и до  $-180^\circ$  к западу. Первый способ регламентирован для представления информации, полученной в миссии LRO, второй – часто используется исследователями для описания результатов измерений по аналогии с земными технологиями картографирования (так координаты модели поверхности фиксируются согласно первому способу, а координаты КА – второму). Долгота определяется как двугранный угол между плоскостью нулевого меридиана и плоскостью меридиана, проходящего через точку наблюдения. Селенографическая широта представляет собой длину дуги вдоль меридиана и отсчитывается от экватора (к северу со знаком плюс, к югу со знаком минус) (рис.1).

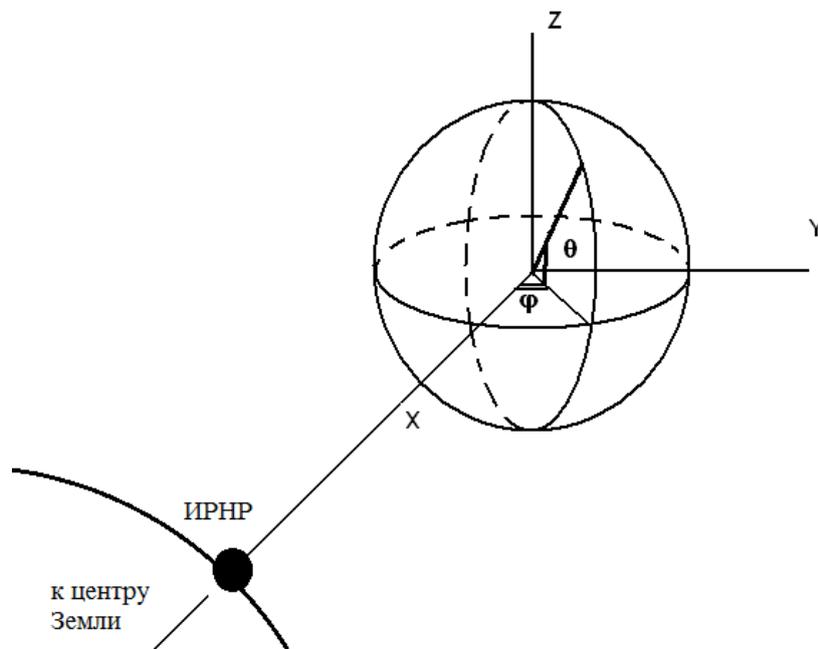


Рис.1 Прямоугольная и сферическая система селенографических координат MOON ME.

Эксперименты радиолокации в бистатическом режиме будут проведены при прохождении Луной и КА сектора сканирования ИРНР, поэтому положение наземного радара во время измерений фиксируется на оси OX. В лучевом приближении задачи радиолокации рассматриваются в плоскости,

проходящей через центр Луны, имеющий координаты в СК MOON ME  $(0;0;0)$ , через ИРНР с координатами  $(L - R_e; 0; 0)$  и КА  $((R_l + H) \cos \theta \cos \varphi; (R_l + H) \cos \theta \sin \varphi; (R_l + H) \sin \theta)$ , где  $L$  - расстояние от Луны до Земли,  $R_e$  - радиус Земли. Эта плоскость, обозначим ее  $\beta$ , определяется условием

$$\begin{vmatrix} x & L - R_e & (R_l + H) \cos \theta \cos \varphi \\ y & 0 & (R_l + H) \cos \theta \sin \varphi \\ z & 0 & (R_l + H) \sin \theta \end{vmatrix} = 0.$$

После преобразования уравнение плоскости  $\beta$  имеет вид

$$y = z \operatorname{ctg} \theta \sin \varphi. \quad (2)$$

Уравнение (2) не зависит от величин  $L$  и  $R_e$ , так как плоскость, задаваемая этим уравнением, включает в себя всю ось ОХ. Плоскость  $\beta$  наклонена к плоскости экватора под углом  $\psi$ . Тангенс угла равен  $\operatorname{tg} \psi = \operatorname{tg} \theta / \sin \varphi$ .

Перейдем от трехмерной СК к двухмерной. В плоскости  $\beta$  построим прямоугольную СК следующим образом: ось ОХ этой системы совпадает с осью ОХ исходной системы MOON ME, а перпендикулярная ей ось  $OZ^*$  связана с осью OZ СК MOON ME соотношением

$$z = z^* \sin \psi = z^* \frac{\sin \theta}{\sqrt{\sin^2 \theta + \cos^2 \theta \sin^2 \varphi}}. \quad (3)$$

С построенной выше прямоугольной СК  $XOZ^*$  плоскости  $\beta$  связана полярная СК, в которой положение КА однозначно определяется двумя параметрами: отрезком ОК, длина которого равна  $R_l + H$ , и углом  $\eta$  (рис.2). Величину угла  $\eta$  можно определить в СК MOON ME, используя координаты точек О,  $E(R_l + H; 0; 0)$  - точки пересечения нулевого меридиана с экватором, и К, которой обозначено геометрическое место космического аппарата:

$$\eta = \arccos(\cos \theta \cos \varphi).$$

Сферичностью волнового фронта, учитывая расстояние до ИРНР, можно пренебречь и считать, что радиосигнал от ИРНР распространяется вдоль прямой AD, параллельной оси OX, до точки D на поверхности Луны, а после отражения от поверхности вдоль прямой DK (рис.2). Точка D такова, что угол ADN (угол между нормалью к поверхности, проведенной из центра Луны к точке D, и направлением на ИРНР – угол падения) равен углу NDK (углу между той же нормалью и направлением на КА – угол отражения). Точка D считается центром области отражения радиоволн на поверхности Луны. В силу параллельности прямой AD оси OX, углы XOD, ADN и NDK – равны и, в данной задаче, обозначены  $\alpha$ .

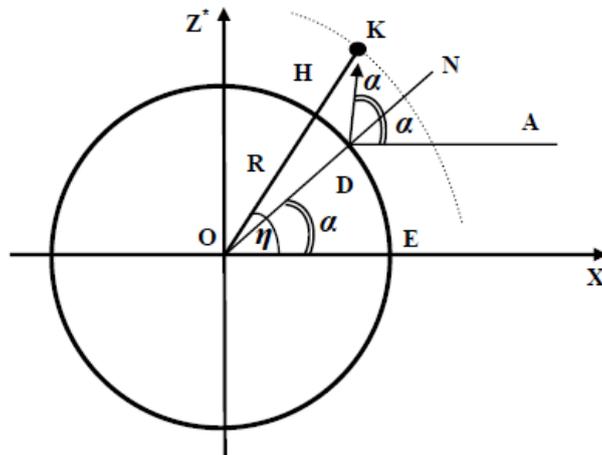


Рис.2 Прямоугольная система координат плоскости  $\beta$ .

### 3.Определение координат центра области отражения

Если бы был известен угол  $\alpha$ , связанный с баллистическими координатами космического аппарата, то в СК  $XOZ^*$  координаты точки D определялись бы соотношениями:

$$x_D = R_l \cos \alpha \text{ и } z^*_D = R_l \sin \alpha . \quad (4)$$

Для того чтобы найти  $\alpha$ , рассмотрим треугольник KOD на рис.2. Из теоремы синусов следует:

$$\frac{OK}{\sin \angle NDK} = \frac{OD}{\sin \angle OKD}$$

с учетом того, что

$$\angle OKD = 180 - \angle KOD - \angle ODK = 180 - (\eta - \alpha) - (180 - \alpha) = 2\alpha - \eta.$$

Таким образом, углы  $\alpha$  и  $\eta$  связаны соотношением:

$$\eta = 2\alpha - \arcsin(R \sin \alpha / (R + H)). \quad (5)$$

На рис.3 приведен график соответствия углов  $\eta$  и  $\alpha$ , выраженных в градусах для высот КА, равных 200, 100, 50 км.

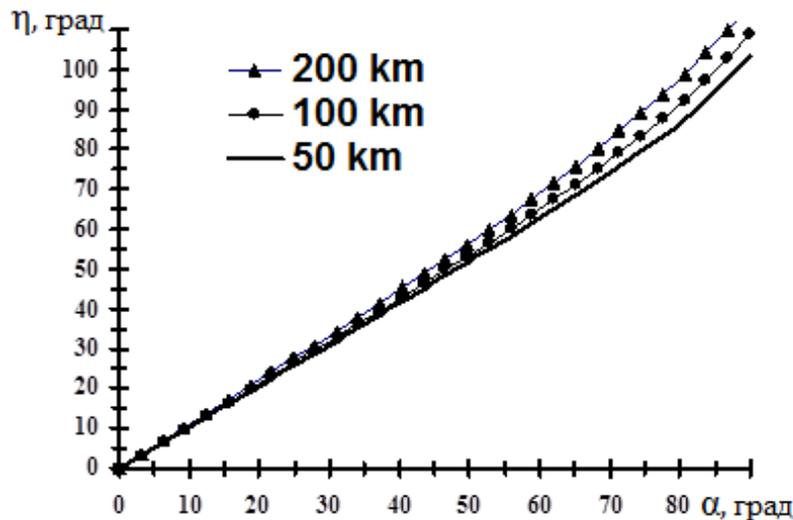


Рис.3 График зависимости  $\eta(\alpha)$ .

В области определения аргумента и значения функция  $\eta(\alpha)$  гладкая и однозначная, что позволяет рассмотреть функцию, обратную ей. График  $\alpha(\eta)$  симметричен относительно прямой  $\alpha = \eta$  и дает возможность по заданному значению  $\eta$ , рассчитанному по известным координатам КА и формуле (5), найти значение  $\alpha$  (следует отметить, что решение находится численно).

По найденному значению угла  $\alpha$  координаты точки D определяются согласно выражениям (4). В итоге формулы для расчета координат точки D в СК MOON ME, с учетом (2) и (3), будут иметь вид:

$$x_D = R_l \cos \alpha \text{ и } y_D = \frac{R_l \sin \alpha \cos \theta \sin \varphi}{\sqrt{\sin^2 \theta + \cos^2 \theta \sin^2 \varphi}}. \quad (6)$$

Третья координата точки D  $z_D$  определяется из массива цифровой 3-D модели поверхности Луны.

На рис.4 даны расчеты расстояния  $\rho$  между подспутниковой точкой и центром района отражения (точкой D). Следует заметить, что точка D всегда лежит между спутником и точкой пересечения нулевого меридиана и экватора, на рис.2 эта точка обозначена E.

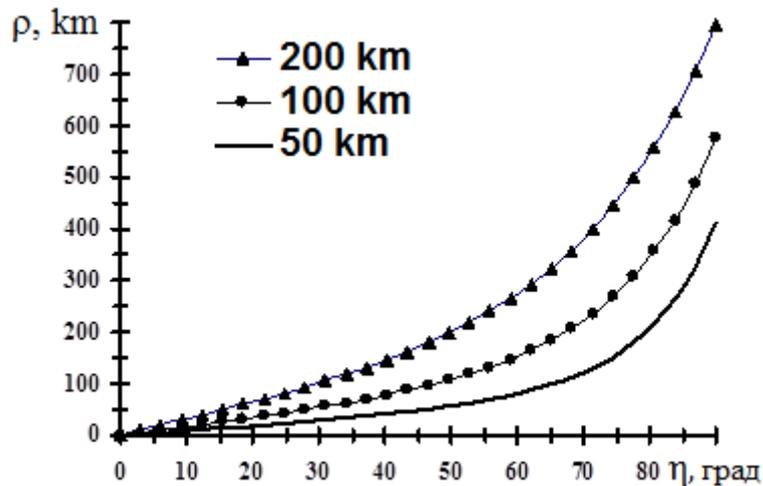


Рис.4 Расстояние между подспутниковой точкой и центром области отражения.

## Заключение

Согласно выполненным расчетам, расстояние между подспутниковой точкой и центром области отражения радиосигнала при бистатической радиолокации Луны составляет от 200 до 800 км при нахождении КА в средних и полярных широтах. Это значит, что регистрация рельефа в районе отражения не может проводиться в режиме реального времени фото и видеоаппаратурой, установленной на КА. Следовательно, при подготовке экспериментов, прогноза и интерпретации результатов измерений необходимо привлекать построенную ранее цифровую 3-D модель поверхности Луны. При этом центр области

поверхности, формирующей отраженный радиосигнал, определяется формулами (6). Линейные размеры области отражения зависят от ее рельефа и от баллистических координат КА, и, как в случае моностатической локации, значительно превышают зону Френеля [5].

Работа выполнена при частичной поддержке Программы №28 фундаментальных исследований Президиума Российской академии наук «Космос: исследование фундаментальных процессов и их взаимосвязей».

### Литература

1. Patterson G.W., Stickle A.M., Turner F.S., et al. Bistatic radar observations of the Moon using Mini-RF on LRO and the Arecibo Observatory // *Icarus*, 2017, Vol. 283, pp. 2–19
2. Smirnov V.M., Yushkova O.V., Marchuk V.N., et al. Luna\_Glob Project: Radio Sounding of the Lunar Soil // *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2013, Vol. 58, No. 9, pp. 911–918. DOI: 10.1134/S106422691309012X
3. Yushkova O.V., Gavrik A.L., Marchuk V.N., et al. Bistatic Radar Detection in the Luna-Resurs Mission // *Solar System Research*, 2018, Vol. 52, No. 4, pp. 287–300. DOI: 10.1134/S0038094618040081
4. Simpson R.A. Spacecraft studies of planetary surface using bistatic radar // *IEEE Trans. Geosci. Electron.*, 1993, Vol. 31, No. 2, pp. 465–482.
5. Smirnov V.M., Yushkova O.V., Karachevtseva I.P., Nadezhdina I.E. The influence of relief on formation of reflected signals of subsurface sounding radar // *Solar System Research*, 2014, Vol. 48, No 3, pp. 176-181 DOI: 10.1134/S003809461403006X

#### Для цитирования:

О. В. Юшкова, Р. А. Рудаменко, В. В. Юшков, А. В. Тertyshnikov. Определение координат центра области отражения при бистатической радиолокации Луны. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2018. № 7. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/jul18/2/text.pdf>  
DOI 10.30898/1684-1719.2018.7.2