

УДК 537.874.2

О ЛОКАЛИЗАЦИИ ОБЛАСТИ ОТРАЖЕНИЯ ПРИ БИСТАТИЧЕСКОЙ РАДИОЛОКАЦИИ ЛУНЫ

О. В. Юшкова¹, Р. А. Рудаменко^{1,2}, В. В. Юшков^{1,2}

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

Статья поступила в редакцию 12 ноября 2018 г.

Аннотация. Рассмотрена задача бистатической локации Луны с помощью двух радаров: один из которых находится на Земле, другой - на лунном орбитальном космическом аппарате. Бистатическая радиолокация Луны запланирована в проекте «Луна-Ресурс». Для подготовки радиолокационных экспериментов, прогноза и интерпретации результатов измерений будет привлечена цифровая 3-D модель поверхности Луны, построенная селенографической системе MOON ME. В работе приведен вывод формул для определения координат границы участка поверхности вносящей наибольший вклад в формирование отраженного сигнала при бистатической радиолокации Луны. Для расчётов используется априорная информация о долготе, широте и высоте над поверхностью Луны космического аппарата.

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

Abstract. The article discusses the issue of determining the area essential for the reflection of radio signals in the bistatic location of the Moon using two radars, one of which is on Earth, the other on the lunar orbital spacecraft. Based on the Fresnel approximation, the region of greatest reflection is defined as a portion of the surface whose center is found from the condition of equality of angles between the normal to the surface and the directions from this point to the receiver and transmitter. The radius of the reflection area is associated with the Fresnel zones, and it is believed that the reflection from the first zone makes the greatest contribution to the reflected signal, however, both practice and numerical simulation show that a surface

significantly exceeding 3-4 Fresnel zones is involved in the formation of the reflected signal. The linear dimensions of the reflection area also depend to a small extent on the ruggedness of the relief of the study area. Consequently, when preparing experiments, predicting and interpreting measurement results, it is necessary to involve a digital 3-D model of the lunar surface. The article presents the derivation of formulas for determining the surface area boundary, which makes the greatest contribution to the formation of the reflected signal. Coordinates can be determined in real time mode by the height, longitude and latitude of the spacecraft.

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

Введение

23 марта 2016 г. в России была утверждена Федеральная космическая программа на 2016 – 2025 гг. В рамках этой программы для изучения Луны и окололунного пространства запланированы запуски трех космических аппаратов (КА): двух посадочных и орбитального. Для дистанционного изучения рельефа и верхнего покрова Луны на орбитальный аппарат будет установлен радиолокационный комплекс РЛК-Л [1, 2]. Разрабатываемый в Специальном конструкторском бюро ИРЭ РАН комплекс РЛК-Л состоит из двух радаров: низкочастотного, предназначенного для исследования свойств и строения коренных пород в слое грунта толщиной в несколько десятков метров, и высокочастотного – для изучения слоя реголита мощностью до нескольких метров. Первоначально планировалась работа радаров в моностатическом режиме. Но после модернизации Иркутского радара Некогерентного Рассеяния (ИРНР), находящегося в ведении Института Солнечно-земной Физики Сибирского отделения РАН, появилась возможность проведения бистатической локации Луны высокочастотным радаром совместно с ИРНР. Исторически сложилось так, что первые опыты бистатической локации Луны проводились по схеме «down link». В этой схеме для локации используется радиосигнал передатчика, размещенного на КА, прием отраженного от Луны сигнала организуется наземными установками. Мощность бортового передатчика

невелика, что обусловлено требованиями электромагнитной совместимости с научной и служебной аппаратуры, а глубина проникновения радиосигналов в грунт зависит от мощности зондируемого сигнала. Энергетические возможности ИРНР и РЛК-Л позволяют проведение экспериментов по схеме «up link». В этой схеме наземный радар будет генерировать ЛЧМ сигнал в диапазоне 154 – 162 МГц, а РЛК-Л принимать. Пиковая мощность сигнала ИРНР достигает 3.2 МВт. На рис.1 приведена схема «up link» бистатической радиолокации Луны: цифрой 1 обозначена трасса прямого сигнала, цифрой 2 - отраженного. Принимаемый сигнал, как в схеме «down link», так и в схеме «up link», является суперпозицией прямого сигнала, распространяющегося от ИРНР до КА, и сигнала ИРНР, отраженного от поверхности Луны. Сравнивая характеристики прямого и отраженного сигналов, можно оценить свойства слоя грунта, формирующего отраженный сигнал. Основным недостатком исследования верхнего покрова Луны методом бистатической локации является невозможность регистрации района отражения видеоаппаратурой, поэтому для картографирования отражательных свойств грунта будет привлечена цифровая 3-D модель поверхности Луны. Модель поверхности построена в координатной системе MOON ME (Mean Earth) по результатам измерения альтиметра в рамках миссии NASA «Lunar Reconnaissance Orbiter».

В данной работе выводятся формулы для локализации района, наиболее существенного для отражения радиосигнала при бистатической локации Луны.

1. Геометрия проведения радиолокации Луны в бистатическом режиме

Бистатические измерения проводятся при условии попадания Луны и КА в сектор сканирования радара наземного базирования. Положение Луны, КА и ИРНР однозначно можно определить в прямоугольной системе селенографических координат MOON ME (Mean Earth). Луна в этой системе задается сферой с радиусом $R_l = 1737400\text{м}$, ее центр совпадает с центром массы Луны и центром системы координат:

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

Оси OX и OY системы MOON ME лежат в плоскости лунного экватора, при этом первая направлена в начальный меридиан, то есть к Земле, а в момент проведения измерений — к наземному радару, вторая ось — в сторону Моря Кризисов. Ось OZ расположена вдоль среднего положения оси вращения Луны и направлена к северному полюсу. С трехмерной прямоугольной системой координат MOON ME связана сферическая система, в которой положение КА фиксируется тремя координатами: H_s - высотой над поверхностью сферы, долготой φ_s , и широтой θ_s (рис.2). Для данной задачи баллистические данные орбитального модуля H_s , φ_s , θ_s являются априорной информацией и связаны с селенографическими координатами формулами: $x_s = (R_l + H_s)\cos\theta_s \cos\varphi_s$, $y_s = (R_l + H_s)\cos\theta_s \sin\varphi_s$, $z_s = (R_l + H_s)\sin\theta_s$.

В лучевом приближении геометрия задачи бистатической радиолокации Луны рассматривается в плоскости, проходящей через центр Луны (точка O), ИРНР (ось OX) и КА. Эта плоскость, назовем ее β , в системе MOON ME задается уравнением $y = zctg\theta_s \sin\varphi_s$. Плоскость β наклонена к плоскости экватора под углом ψ_s , тангенс угла которого находится из соотношения

$$tg\psi_s = tg\theta_s / \sin\varphi_s . \quad (2)$$

Угол ψ_s меняется с изменением положения КА. В плоскости β можно определить центр области отражения радиосигнала, используемого для радиолокации верхнего покрова Луны.

Строим прямоугольную систему координат, связанную с плоскостью β , так чтобы ось OX совпадала с осью OX исходной системы MOON ME, а перпендикулярная ей ось OZ* была связана с осью OZ системы MOON ME соотношением (рис.3):

$$z = z^* \sin\psi_s = z^* \frac{\sin\theta_s}{\sqrt{\sin^2\theta_s + \cos^2\theta_s \sin^2\varphi_s}} . \quad (3)$$

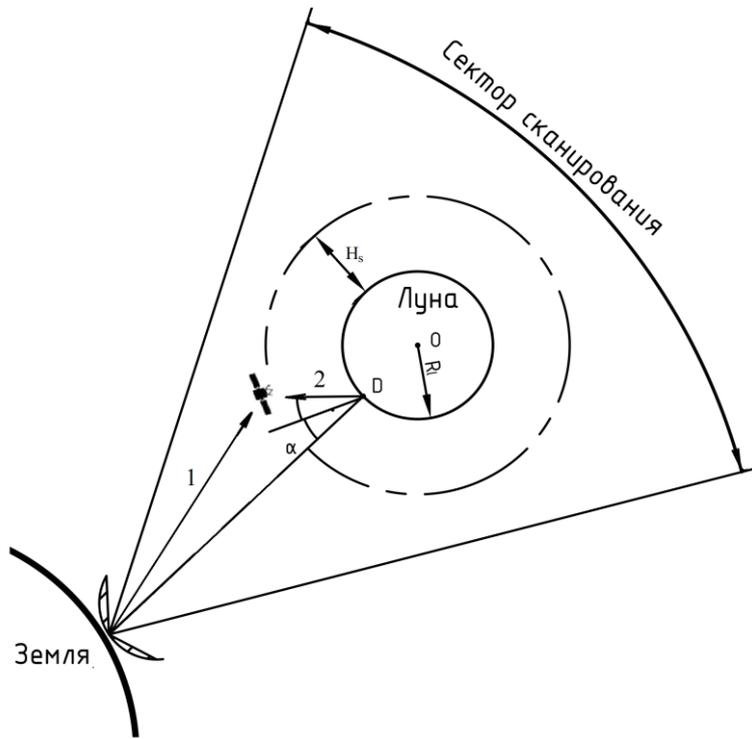


Рис.1 Схема «up link» проведения бистатической локации Луны.

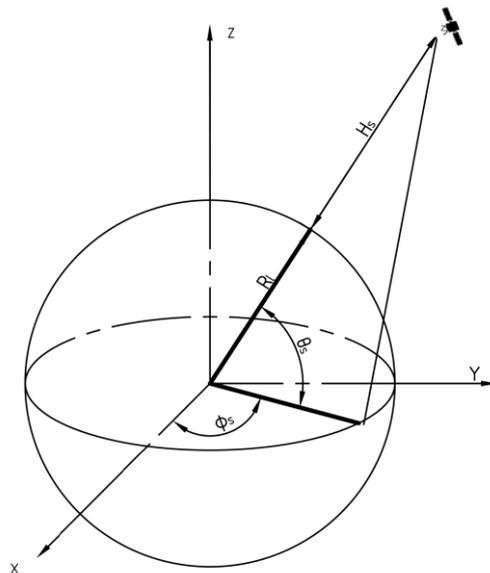


Рис.2 Прямоугольная и сферическая системы селенографических координат MOON ME.

Учитывая расстояние до ИРНР, сферичностью волнового фронта 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 до космического аппарата, обозначенного на рис.3 точкой K . Точка D такова, что угол ADN (угол между

нормалью к поверхности, проведенной из центра Луны к точке D, и направлением на ИРНР, т.е. угол падения) равен углу NDK (углу между той же нормалью и направлением на КА, т.е. углу отражения). На рисунках угол падения обозначен α . Точка D является центром области отражения радиоволн на поверхности Луны (рис.1, 3). Координаты этой точки зависят от координат космического аппарата H_s, φ_s, θ_s и в система MOON ME задаются выражениями [3]:

$$x_D = R_l \cos \alpha \text{ и } y_D = \frac{R_l \sin \alpha \cos \theta \sin \varphi}{\sqrt{\sin^2 \theta + \cos^2 \theta \sin^2 \varphi}}. \quad (4)$$

В формуле (4) угол α определяется численно из уравнения $\arccos(\cos \theta_s \cos \varphi_s) = 2\alpha - \arcsin(R_l \sin \alpha / (R_l + H_s))$. Если учесть, что высота H_s много меньше радиуса Луны R_l , то $\alpha = \arccos(\cos \theta_s \cos \varphi_s)$. Выражение для определения третьей координаты точки D - z_D следует из уравнения (1):

$$z_D = \frac{R_l \sin \alpha \sin \theta}{\sqrt{\sin^2 \theta + \cos^2 \theta \sin^2 \varphi}}. \text{ Если в задаче требуется учесть реальную}$$

поверхность, значение z_D , выбирается с учетом цифровой 3-D модели поверхности Луны.

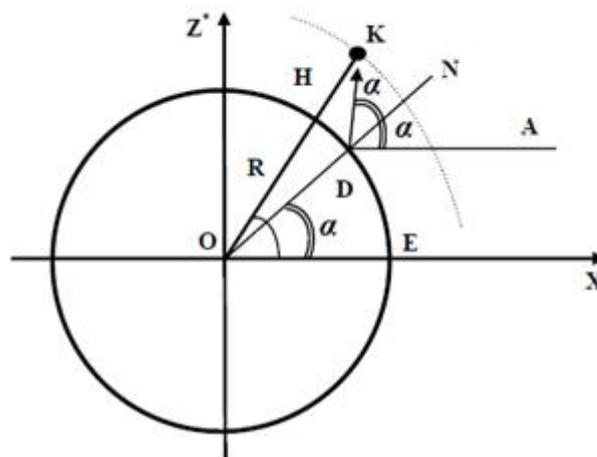


Рис.3 Система координат плоскости β .

2. Координаты границы области отражения радиосигнала

При идеально ровной однородной поверхности сферы описания отражения радиоволн, получаемые на основе волновой теории и геометрической оптики, совпадают. При неровной или неоднородной отражающей поверхности законы геометрической оптики можно использовать только для оценки процесса отражения. Кроме того, следует отметить, что лучевое приближение разрабатывалось для описания отражательных свойств монохроматических сигналов, а в настоящее время часто используются сложные сигналы, как, например, в нашем случае для радиолокации применяется сигнал с линейно модулируемой частотой. Опираясь на существующую практику, для оценки отражения радиосигнала мы использовали законы геометрической оптики для одной частоты - $f = 160$ МГц.

При работе ИРНР засвечивается вся видимая поверхность Луны. На рис.4 схематично изображена диаграмма рассеяния радиоволн неоднородной поверхностью, учитывающая две компоненты: диффузное рассеяние и квази-зеркальное отражение. На рисунке 4 область диффузного рассеяния соответствует заштрихованной части и на практике совпадает с районом, облученным в процессе зондирования. Квази-зеркальная компонента обозначена серым цветом, в лучевом приближении радиофизики она моделируется лучевой трубкой, диаметр которой связывают с зоной Френеля d_F [4].

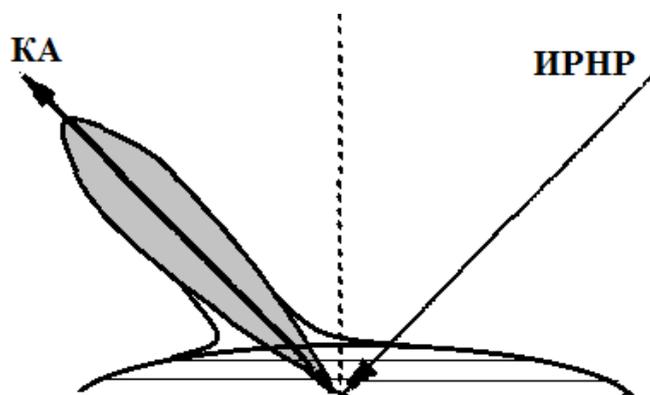


Рис. 4 Схема диаграммы рассеяния радиоволн неоднородной поверхностью.

Координаты границы участка поверхности наиболее существенной для отражения можно определить как пересечение лучевой трубки и сферы (1). Обозначим границу кривой $F(x, y, z)$. С математической точки зрения, лучевая трубка представляет собой цилиндр, ось которого проходит через точки $D(x_D, y_D, z_D)$, если центр площадки отражения имеет координаты x_D, y_D и z_D , и $K(x_s, y_s, z_s)$. Будем считать, что ось цилиндра, прямая DK, параллельна вектору \vec{M} , координаты которого $(x_s - x_D, y_s - y_D, z_s - z_D)$. Радиус цилиндра равен зоне Френеля d_F . Для того, что бы определить координаты $F(x, y, z)$ проведем серию ортогональных преобразований системы координат MOON ME. Для простоты обозначим ее XYZ. Построим систему $X_1Y_1Z_1$, повернув систему XYZ вокруг оси OX на угол $90 - \psi_s$ по часовой стрелке. В этой

системе для любой точке выполнены соотношения:
$$\begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{pmatrix} = M_1 \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}, \text{ где}$$

$$M_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \sin \psi_s & \cos \psi_s \\ 0 & -\cos \psi_s & \sin \psi_s \end{pmatrix} - \text{ матрица перехода. В силу того, что матрица } M_1 -$$

ортогональная, $M^{-1}_1 = M^T_1$. После этого преобразования ось OZ_1 лежит в плоскости β , а ось OX_1 совпадает с осью OX. Следующая система координат $X_2Y_2Z_2$ построена поворотом оси OZ_1 в плоскости β вокруг оси OY_1 на угол равный $90^\circ - \alpha$ по часовой стрелке так, чтобы ось OZ_2 совпала с прямой OD.

Для системы $X_2Y_2Z_2$ верно соотношения:
$$\begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{pmatrix} = M_2 \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{pmatrix}, \text{ где}$$

$$M_2 = \begin{pmatrix} \sin \alpha & 0 & \cos \alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ -\cos \alpha & 0 & \sin \alpha \end{pmatrix}. \text{ Матрица } M_2 - \text{ тоже ортогональная, и поэтому}$$

$M^{-1}_2 = M^T_2$. Теперь параллельным переносом системы $X_2Y_2Z_2$ построим

систему $X_3Y_3Z_3$ так, чтобы ее центр был расположен в точке D. В этом случае

любая точка пространства имеет формулу перехода:
$$\begin{pmatrix} x_3 \\ y_3 \\ z_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} x_D \\ y_D \\ z_D \end{pmatrix}.$$

Последнюю систему $X_4Y_4Z_4$ получим из $X_3Y_3Z_3$ поворотом на угол α вокруг оси OY_3 по часовой оси так, чтобы ось OZ_4 совпала с прямой DK, при этом

будет выполняться
$$\begin{pmatrix} x_4 \\ y_4 \\ z_4 \end{pmatrix} = M_3 \begin{pmatrix} x_3 \\ y_3 \\ z_3 \end{pmatrix},$$
 где
$$M_3 = \begin{pmatrix} \cos \alpha & 0 & \sin \alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \alpha & 0 & \cos \alpha \end{pmatrix},$$
 а обратная

ей матрица равна транспонированной $M^{-1}_3 = M^T_3$. В системе $X_4Y_4Z_4$ лучевая трубка аппроксимируется цилиндром $x_4^2 + y_4^2 = d_F^2$. Это же уравнение в

параметрическом виде можно записать соотношениями
$$\begin{pmatrix} x_4 \\ y_4 \\ z_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} d_F \cos \gamma \\ d_F \sin \gamma \\ v \end{pmatrix},$$
 где

γ - параметр, который принимает значение от 0° до 360° , $v \in (-\infty; +\infty)$. В системе $X_3Y_3Z_3$ координаты окружности (7) будут преобразованы к виду:

$$\begin{pmatrix} x_3 \\ y_3 \\ z_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \alpha & 0 & -\sin \alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \alpha & 0 & \cos \alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d_F \cos \gamma \\ d_F \sin \gamma \\ v \end{pmatrix}.$$

В этой системе при пересечении с плоскостью X_3Y_3O цилиндр имеет в сечении эллипс $(x_3 \cos \alpha)^2 + y_3^2 = d_F^2$, вытянутый вдоль оси OX_3 , что согласуется с [5].

Операция
$$\begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_3 \\ y_3 \\ z_3 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x_D \\ y_D \\ z_D \end{pmatrix}$$
 обеспечивает переход в систему координат

$X_2Y_2Z_2$, именно в этой системе проще всего найти формулы, задающие координаты кривой $F(x, y, z)$, полученной в результате пересечения конуса и сферы (1). Для этого решим следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} x_2 = d_F \cos \alpha \cos \gamma - v \sin \alpha + x_D \\ y_2 = d_F \sin \gamma + y_D \\ z_2 = d_F \sin \alpha \cos \gamma + v \cos \alpha + z_D \\ x_2^2 + y_2^2 + z_2^2 = R_l^2 \end{cases}.$$

В этой системе уравнений координаты x_2, y_2, z_2 однозначно определяются параметром γ , если известно значение v . Найдем это значение, сведя систему к квадратному относительно v уравнению:

$$(d_F \cos \alpha \cos \gamma - v \sin \alpha + x_D)^2 + (d_F \sin \gamma + y_D)^2 + (d_F \sin \alpha \cos \gamma + v \cos \alpha + z_D)^2 = R_l^2$$

После упрощения это уравнение имеет вид:

$$v^2 - 2v(x_D \sin \alpha - z_D \cos \alpha) + (d_F^2 + 2d_F(x_D \cos \alpha + z_D \sin \alpha) \cos \gamma + 2d_F y_D \sin \gamma) = 0$$

Уравнение решается аналитически, имеет два корня. Меньший корень V_- применим для северного полушария. Большой корень V_+ подходит для южного полушария. Оба корня являются функциями от H_s, φ_s, θ_s и параметра γ . Таким образом, координаты кривой $F(x, y, z)$ в системе MOON ME задаются параметрическими уравнениями

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = M \begin{pmatrix} d_F \cos \alpha \cos \gamma - V_{\mp} \sin \alpha + x_D \\ d_F \sin \gamma + y_D \\ d_F \sin \alpha \cos \gamma + V_{\mp} \cos \alpha + z_D \end{pmatrix}, \text{ где матрица } M = M_1^T M_2^T \text{ и имеет}$$

следующий вид:
$$M = \begin{pmatrix} \sin \alpha & 0 & -\cos \alpha \\ -\cos \psi_s \cos \alpha & \sin \psi_s & -\cos \psi_s \sin \alpha \\ \sin \psi_s \cos \alpha & \cos \psi_s & \sin \psi_s \sin \alpha \end{pmatrix}.$$

Координаты $F(x, y, z)$ можно определять в режиме реального времени по известным координатам космического аппарата.

Заключение

В статье рассмотрен вопрос определения области, существенной для отражения радиосигналов при бистатической локации Луны, с помощью двух радаров, один из которых находится на Земле, другой - на лунном орбитальном космическом аппарате. Исходя из приближения Френеля, область наибольшего

отражения определяется как участок поверхности, центр которого находится из условия равенства углов между нормалью к поверхности и направлениями от основания нормали к приемнику и передатчику. Радиус области отражения связывают с зонами Френеля, причем считается, что отражение от первой зоны вносит наибольший вклад в отраженный сигнал, однако и практика, и численное моделирование показывают, что в формировании отраженного сигнала участвует поверхность, значительно превышающая 3-4 зоны Френеля [6]. Не в малой степени линейные размеры участка отражения зависят и от расчлененности рельефа района исследования. Следовательно, при подготовке экспериментов, прогноза и интерпретации результатов измерений необходимо привлекать цифровую 3-D модель поверхности Луны. В работе приведен вывод формул, по которым при бистатической локации Луны для аппарата, находящегося на высоте H_s в φ_s градусах долготы и θ_s градусах широты можно определить в селенографической системе MOON ME координаты границы участка поверхности, вносящей наибольший вклад в формирование отраженного сигнала.

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

Литература

1. 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](https://doi.org/10.1134/S106422691309012X)
2. 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](https://doi.org/10.1134/S0038094618040081)
3. Yushkova O.V., Rudamenko R.A., Yushkov V.V. About coordinates of reflected spot center in bistatic sounding of the Moon. *Zhurnal Radioelektroniki* -

Journal of Radio Electronics, 2018, № 7, Available at <http://jre.cplire.ru/jre/jul18/2/text.pdf>, DOI [10.30898/1684-1719.2018.7.2](https://doi.org/10.30898/1684-1719.2018.7.2) (In Russian)

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. Feinberg E.L. *Rasprostranenie radiovoln vdol' zemnoy poverhnosti*. [Radio wave propagation along Earth's surface]. Moscow, Fizmatlit Publ. 1999. 496 p. (In Russian)
6. 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. 167–181. DOI <https://doi.org/10.1134/S003809461403006X>

Для цитирования:

О. В. Юшкова, Р. А. Рудаменко, В. В. Юшков. О локализации области отражения при бистатической радиолокации Луны. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2018. № 11. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/nov18/10/text.pdf>
DOI 10.30898/1684-1719.2018.11.10