УДК 537.874.2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОМПЛЕКСНОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ГРУНТА В РЕЖИМЕ БИСТАТИЧЕСКОЙ РАДИОЛОКАЦИИ

О. В. Юшкова ¹*, В. В. Юшков ²

¹ Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, г. Фрязино Московской области;

² Московский госуниверситет им. М. В. Ломоносова, г. Москва, Россия

Обсуждается возможность определения диэлектрических характеристик грунта Луны методом бистатической локации. Представлены аналитические формулы для нахождения комплексной диэлектрической проницаемости грунта по измеренным значениям угла Брюстера и коэффициента отражения вертикально поляризованной волны. Рассмотрены условия взаимнооднозначного соответствия значений угла Брюстера и диэлектрических характеристик грунта.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из дистанционных методов изучения верхнего покрова космических тел является бистатическая радиолокация. Для проведения бистатических исследований требуются разнесённые в пространстве радиопередатчик и радиоприёмник. Первые радиолокационные бистатические эксперименты по исследованию грунта Луны были выполнены при помощи бортовых передатчиков космической связи спутников «Луна-10», «Луна-12», «Луна-14», «Луна-19», «Луна-22» [1, 2], «Lunar orbiter-1» [3], «Explorer-35» [4, 5], «Apollo-14», «Apollo-15», «Apollo-16» [6], «Clementine» [7]. Приём излучённых со спутников радиосигналов осуществлялся на Земле.

Обработка результатов экспериментов показала, что принимаемые сигналы являются интерференцией прямого и отражённого сигналов. Прямой сигнал — это сигнал передатчика, распространяющийся по трассе «передатчик—приёмник», отражённый — сигнал передатчика, который достиг поверхности Луны и после взаимодействия с грунтом также был принят на Земле. Частотная селекция позволила разделить эти сигналы. В результате сопоставления отношения измеренных мощностей прямого и отражённого сигналов с соответствующими теоретическими зависимостями было определено значение коэффициента отражения.

Использование лучевого приближения при интерпретации результатов измерений и предположение об отсутствии поглощения радиоволн лунным грунтом дало возможность найти усреднённую диэлектрическую проницаемость верхнего покрова [8, 9]. При анализе коэффициента отражения было обнаружено, что на Луне существуют локальные районы, поверхностные породы которых отличаются высокими отражающими свойствами [10]. Сравнение энергетических спектров отражённых сигналов показало, что форма спектра зависит от рельефа и может служить индикатором неровности поверхности района исследования [11]. В измерениях, проведённых спутником «Explorer-35», зафиксированы изменения коэффициента отражения при углах падения радиоволн, близких к углу Брюстера [12]. Накопленный опыт обработки экспериментальных данных позволил разработать методики сопоставления результатов радиоизмерений и карты Луны, показать различие отражающих свойств грунтов лунных морей и возвышенностей [13, 14].

Для выявления более тонких эффектов отражения радиоволн при проведении экспериментов со спутника «Луна-22» был использован сигнал с линейной частотной модуляцией. Измерения

^{*} o.v.y@mail.ru

показали, что бистатическая радиолокация может применяться для определения высоты аппарата над поверхностью [15]. С аппаратов «Apollo-14», «Apollo-15» и «Apollo-16» была проведена одновременная локация на двух частотах, один из сигналов имел вертикальную поляризацию. При анализе результатов экспериментов было показано, что отражение сигнала от грунта и его рассеяние поверхностью зависит от частоты [6]. В результате измерений, выполненных с аппарата «Clementine», снова были обнаружены области, в которых коэффициент отражения сигналов был выше ожидаемого [7]. Оказалось, что многие из таких областей находятся в приполярных районах. В результате интерпретации результатов бистатической радиолокации была выдвинута гипотеза о существовании подповерхностных залежей льда в вечнозатенённых кратерах. Для проверки этой гипотезы была повторена радиолокация приполярных областей. Поскольку разрешающая способность радиолокации и глубина зондирования зависят, в первую очередь, от энергетического потенциала передатчика, а использование на космическом аппарате мощного передатчика ограничено нормами энергопотребления и требованиями электромагнитной совместимости с чувствительными научными и служебными приборами, то в качестве передатчика в следующей серии измерений использовался радиокомплекс обсерватории Аресибо [16]. Пиковая мощность гигагерцового сигнала составляла 200 кВт, приём выполнялся на аппарате «Lunar Reconnaissance Orbiter». Обработка экспериментальных данных не выявила очевидных доказательств существования подповерхностных неоднородностей грунта в приполярных районах. Поскольку наличие или отсутствие водяного льда определяет стратегию освоения Луны, проведение аналогичных исследований планируется в рамках российской миссии «Луна—Ресурс» [17]. Целью радиолокационных экспериментов этой миссии будет детальное изучение диэлектрических свойств грунта на поверхности и в приповерхностном слое.

При лабораторных исследованиях образцов лунного грунта, доставленных на Землю возвратными миссиями «Apollo» и «Луна», было показано, что действительная часть диэлектрической проницаемости породы ε' , в зависимости от минералогического состава, может принимать значения от 1,6 до 12,0. Значение ε' каждого образца незначительно варьируется при изменении частоты и температуры (суточная вариация температуры на поверхности Луны в экваториальных областях от -160 °C до 130 °C) в отличие от тангенса угла потерь tg δ , который может принимать значения от 10^{-4} до 1 [18–22]. Подготовка научной программы радиолокационных экспериментов миссии «Луна—Ресурс» сделала актуальным решение задачи определения комплексной диэлектрической проницаемости грунта $\varepsilon = \varepsilon' + i\varepsilon'' = \varepsilon'(1 + i \text{ tg } \delta)$ по бистатическим радиолокационным измерениям. В данной работе рассмотрена возможность нахождения параметров ε' и tg δ грунта по измеренным значениям модуля коэффициента отражения вертикально поляризованной волны в окрестности угла Брюстера.

1. КОЭФФИЦИЕНТ ОТРАЖЕНИЯ РАДИОВОЛН ОТ ЛУНЫ

Как показано в работах [1, 23], коэффициент отражения радиоволны от Луны при бистатической радиолокации можно представить в виде произведения двух множителей:

$$R = T |M|. \tag{1}$$

Множитель T соответствует коэффициенту отражения радиоволны по напряжённости поля от гладкого шара, аппроксимирующего Луну, множитель M — коэффициенту отражения от плоской границы среды, касательной к этому шару в центре области отражения. Коэффициент T зависит только от угла падения радиоволн θ и отношения r/a, где r — расстояние от космического

аппарата до центра области отражения, а — радиус Луны:

$$T = \left[\left(1 + \frac{2r}{a\cos\theta} \right) \left(1 + \frac{2r\cos\theta}{a} \right) \right]^{-1/2}.$$
 (2)

Значение T находится по баллистическим параметрам космического аппарата, поэтому считается известным. Поскольку в данной работе рассматривается случай отражения волн с вертикальной поляризацией, то коэффициент отражения M в формуле (1) задаётся хорошо известной комплексной функцией, зависящей от угла падения радиоволн θ и комплексной диэлектрической проницаемости грунта [24]:

$$M = \frac{\sqrt{\varepsilon} \cos \theta - \cos \gamma}{\sqrt{\varepsilon} \cos \theta + \cos \gamma}.$$
(3)

Здесь $\gamma-$ угол преломления. Если ввести показатель преломления n и показатель поглощения η с помощью известных соотношений

$$n = \sqrt{\varepsilon'} \sqrt{\frac{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta} + 1}{2}}, \qquad \eta = \sqrt{\varepsilon'} \sqrt{\frac{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta} - 1}{2}}, \qquad (4)$$

то $\sqrt{\varepsilon} = n + i\eta$ и $\cos \gamma = \sqrt{1 - (\sin^2 \theta)/n^2}.$

С использованием введённых величин n и η (4) комплексный коэффициент отражения M (3) будет иметь вид

$$M = \frac{n^2 - F^2 + \eta^2}{(n+F)^2 + \eta^2} + i \frac{2\eta F}{(n+F)^2 + \eta^2}.$$
(5)

Соответственно, модуль этого коэффициента даётся формулой

$$|M| = \sqrt{\frac{(n-F)^2 + \eta^2}{(n+F)^2 + \eta^2}}.$$
(6)

Здесь $F = \sqrt{1 + (1 - 1/n^2) \operatorname{tg}^2 \theta}.$

На рис. 1 приведена зависимость модуля коэффициента отражения |M| от угла падения волны θ . Линии построены для наименьших и наибольших из лабораторно измеренных значений действительной части диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь лунных образцов. При каждом фиксированном значении ε' при росте угла θ до значения θ_0 функция |M| убывает, а затем возрастает до 1. Из расчётов следует, что минимальное значение |M| может наблюдаться при углах падения $45^{\circ} \div 75^{\circ}$.

Известно, что для вертикально поляризованной электромагнитной волны существует такой угол падения θ_0 , при котором коэффициент отражения от однородного пространства, заполненного непоглощающим веществом с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon = \varepsilon'$, равен нулю. Согласно закону Брюстера, величина угла θ_0 и диэлектрическая проницаемость связаны соотношением

$$\theta_0 = \operatorname{arctg} \sqrt{\varepsilon} \,. \tag{7}$$

Рассмотрим особенности отражения радиоволн от плоской границы раздела со средой, имеющей поглощение. Как видно из рис. 1, при tg $\delta \neq 0$ существует такой угол θ_0 , при котором модуль коэффициента отражения |M| принимает наименьшее значение. Для того, чтобы найти значение θ_0 , рассмотрим условие равенства нулю производной |M| по углу θ , которое сводится к соотношению

$$n^2 + \eta^2 = F_0^2, (8)$$

765

О. В. Юшкова, В. В. Юшков





Рис. 1. Зависимость модуля коэффициента отражения |M| от угла падения волны θ при $\varepsilon' = 1.6$, tg $\delta = 0$ (линия 1), $\varepsilon' = 1.6$, tg $\delta = 1$ (линия 2), $\varepsilon' = 12$, tg $\delta = 0$ (линия 3) и $\varepsilon' = 12$, tg $\delta = 1$ (линия 4)

Рис. 2. Изменение угла Брюстера в зависимости от действительной части диэлектрической проницаемости ε' грунта Луны при tg $\delta = 1,0$ (линия 1), tg $\delta = 0,5$ (линия 2) и tg $\delta = 0,1$ (линия 3)

где $F_0 = \sqrt{1 + (1 - 1/n^2) \operatorname{tg}^2 \theta_0}$. Заметим, что согласно соотношению (8) при падении волны под углом Брюстера Re M = 0 (см. (5)). Из соотношения (8) следует, что для грунта с показателем преломления n и показателем поглощения η угол Брюстера равен

$$\theta_0 = \operatorname{arctg}\left(n \sqrt{1 + \frac{\eta^2}{n^2 - 1}}\right). \tag{9}$$

При tg $\delta = 0$ показатель поглощения $\eta = 0$ и выражение (9) совпадает с формулой (7), которая задаёт взаимно однозначное соответствие между диэлектрической проницаемостью вещества и значением θ_0 .

При tg $\delta \neq 0$ связь между диэлектрической проницаемостью вещества и углом Брюстера может быть не взаимно однозначной. На рис. 2 приведена серия кривых, демонстрирующих изменения угла Брюстера θ_0 при изменении действительной части диэлектрической проницаемости ε' от 1 до 12 для различных значений tg δ . Как видно из рис. 2, в области малых значений ε' кривые имеют локальные минимумы. Это значит, что при отражении радиоволн от грунтов с разными диэлектрическими параметрами значение угла Брюстера может быть одинаковым.

Определим, для каких значений ε' нарушается взаимно однозначное соответствие между ε' и θ_0 . На рис. 3 приведена зависимость θ_0 от ε' для $\varepsilon' = 1,0\div1,5$. Уравнение линии, соединяющей минимумы функций на рис. 3, находится из условия равенства нулю производной функции (9) по переменной ε' . Условие $(\theta_0)'_{\varepsilon'} = 0$ преобразуется к соотношению, связывающему ε' и tg² δ в точке минимума функции θ_0 :

$$\varepsilon^{\prime 2} \left(\sqrt{1 + \mathrm{tg}^2 \, \delta} \right)^2 + \left(\varepsilon^{\prime 2} - 4\varepsilon^{\prime} \right) \sqrt{1 + \mathrm{tg}^2 \, \delta} + 2 = 0.$$

Из полученного квадратного уравнения следует, что величина $\sqrt{1+\mathrm{tg}^2\,\delta}$ может принимать два значения:

$$\sqrt{1 + \mathrm{tg}^2 \,\delta} = \frac{4 - \varepsilon' + \sqrt{\varepsilon'^2 - 8\varepsilon' + 8}}{2\varepsilon'}; \qquad \sqrt{1 + \mathrm{tg}^2 \,\delta} = \frac{4 - \varepsilon' - \sqrt{\varepsilon'^2 - 8\varepsilon' + 8}}{2\varepsilon'}. \tag{10}$$

Каждое из решений (10) при подстановке в соотношения (4) определяет коэффициент прохождения n_j и коэффициент поглощения η_j , j = 1, 2. Для этих коэффициентов соотношение (9) задаёт

О. В. Юшкова, В. В. Юшков



Рис. 3. То же, что на рис. 2, для более узкого интервала значений ε' и tg $\delta = 1; 0,5; 0,1; 0,05$ (линии 1–5 соответственно)



Рис. 4. Угловая зависимость коэффициента отражения при tg $\delta = 0$ (линия 1) и tg $\delta = 1$ (линия 2). Линии 3 и 4 соответствуют минимальным значениям коэффициентов отражения и не превосходят 0,42

уравнения двух линий, проходящих по точкам локального минимума каждой кривой на рис.3 (линии 6 и 7) и практически выделяющих область, в которой нарушается взаимная однозначность соответствия угла Брюстера и ε' :

$$\theta_j = \operatorname{arctg}\left(n_j \sqrt{n_j^2 + \eta_j^2}\right).$$

Данные линии сходятся в одну точку при выполнении условия ${\varepsilon'}^2 - 8{\varepsilon'} + 8 = 0$, т. е при ${\varepsilon'} = 4 - 2\sqrt{2} \approx 1,2$ (чёрная точка на рис. 3). Поскольку для грунта Луны ${\varepsilon'} \ge 1,6$, то при его исследовании методом бистатической радиолокации диэлектрические характеристики подстилающей поверхности определяются однозначно.

Далее определим, чему равен коэффициент отражения радиоволн при падении под углом θ_0 на грунт, для которого tg $\delta \neq 0$. Используя соотношение (8), запишем уравнение (6) в виде

$$|M(\theta_0)| = \sqrt{\frac{\sqrt{n^2 + \eta^2} - n}{\sqrt{n^2 + \eta^2} + n}}$$

Фактически значение модуля коэффициент отражения при падении под углом θ_0 зависит только от тангенса угла потерь:

$$|M(\theta_0)| = \sqrt{\frac{\sqrt{1 + (\eta/n)^2} - 1}{\sqrt{1 + (\eta/n)^2} + 1}},$$
(11)

где $\eta/n = \sqrt{(\sqrt{1 + \mathrm{tg}^2 \delta} - 1)/(\sqrt{1 + \mathrm{tg}^2 \delta} + 1)}$. Зависимость $|M(\theta_0)|$ представляет из себя монотонную возрастающую функцию; с увеличением $\mathrm{tg}^2 \delta$ отношение η/n стремится к 1. При этом согласно соотношению (11) $|M(\theta_0)| \leq \sqrt{(\sqrt{2} - 1)/(\sqrt{2} + 1)} \approx 0.42$. На рис. 4 приведены графики зависимости $|M(\theta)|$ для $\theta = 45^{\circ} \div 90^{\circ}$. Считается, что $\varepsilon' = 3$ (средняя диэлектрическая проницаемость реголита). Минимальные значения зависимостей 1 и 2 лежат на линии 3, заданной формулой (11). Минимальные значения $|M(\theta)|$ для всех промежуточных величин 0 < tg $\delta < 1$ также лежат на линии 3. Линия 4 на рис. 4 соответствует минимальным значениям коэффициентов отражений от грунта с $\varepsilon' = 10$ при изменении tg δ от 0 до + ∞ . Зависимости 3 и 4 сходятся при больши́х потерях, но при этом $|M(\theta)| \leq 0.4$.

О. В. Юшкова, В. В. Юшков

2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОМПЛЕКСНОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ

Будем считать, что в результате длительного проведения бистатической радиолокации накоплена информация о коэффициенте отражения радиоволны с одной частотой от одного и того же участка поверхности с относительно ровным рельефом. Поскольку диэлектрические параметры лунного грунта зависят от температуры, при построении зависимости $|M(\theta)|$ от угла падения радиоволн θ следует учитывать местное время проведения измерений. По построенной зависимости определяется угол Брюстера θ_0 и $|M(\theta_0)|$. Из соотношения (4) следует, что диэлектрические параметры $\varepsilon' = n^2 - \eta^2$, $\varepsilon'' = 2n\eta$ и tg $\delta = 2n\eta/(n^2 - \eta^2)$.

Из выражения (11) получаем, что

t

$$\eta = \frac{2 |M(\theta_0)|}{1 - |M(\theta_0)|^2} n \tag{12}$$

И

$$g \delta = \frac{4 |M(\theta_0)| (1 - |M(\theta_0)|^2)}{|M(\theta_0)|^4 - 6 |M(\theta_0)|^2 + 1}.$$
(13)

Для определения ε_1 найдём n^2 . Из соотношений (9) и (12) можно получить следующее уравнение для n^2 :

$$n^4 G \cos^2 \theta_0 - n^2 + \sin^2 \theta_0 = 0, \tag{14}$$

где $G = \{[1 + |M(\theta_0)|^2]/[1 - |M(\theta_0)|^2]\}^2$. Уравнение (14) имеет корни $n_1^2 = [1 - \sqrt{1 - G \sin^2 2\theta_0}]/(2G \cos^2 \theta_0)$ и $n_2^2 = [1 + \sqrt{1 - G \sin^2 2\theta_0}]/(2G \cos^2 \theta_0)$, которые определяют два значения действительной части диэлектрической проницаемости:

$$\varepsilon_1' = \frac{|M(\theta_0)|^4 - 6|M(\theta_0)|^2 + 1}{[1 + |M(\theta_0)|^2]^2} \frac{1 - \sqrt{1 - G\sin^2(2\theta_0)}}{2\cos^2\theta_0},$$
(15)

$$\varepsilon_2' = \frac{|M(\theta_0)|^4 - 6|M(\theta_0)|^2 + 1}{[1 + |M(\theta_0)|^2]^2} \frac{1 + \sqrt{1 - G\sin^2(2\theta_0)}}{2\cos^2\theta_0}.$$
 (16)

Поскольку для грунта $\varepsilon' > 1,2$, для рассматриваемой задачи решение единственное, т. е. ε' определяется формулой (16).

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выведенные в работе формулы (16) и (13) позволяют вычислить величину действительной части диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь лунного грунта на поверхности по измеренным значениям угла Брюстера и модуля коэффициента отражения вертикально поляризованной волны. Формулы (9) и (11) дают возможность прогнозировать изменение значения угла Брюстера и $|M(\theta_0)|$ при тепловых вариациях tg δ .

Закон Брюстера часто используется для дистанционного определения характеристик отражающих сред при условии, что поглощением в среде можно пренебречь. Однако диэлектрические потери, характеризующие превращение части электрической энергии в тепловую, являются важной электрофизической характеристикой вещества. Для задач, в которых представляет интерес именно величина потерь, результаты данной работы будут наиболее полезны.

Работа выполнена в рамках Государственного задания при частичной финансовой поддержке Программы № 7 фундаментальных исследований Президиума РАН «Экспериментальные и теоретические исследования объектов Солнечной системы и планетных систем звёзд».

О.В. Юшкова, В.В. Юшков

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Яковлев О.И. Космическая радиофизика. М.: Научная книга, 1988. 432 с.
- 2. Павельев А. Г., Кучерявенков А. И. Итоги науки и техники. Радиотехника, 1994. Т. 44. 81 с.
- 3. Tyler G. L., Eshleman V. R., Fjeldbo G., et al. // Science. 1967. V. 157, No. 3785. P. 193.
- 4. Tyler G. L. // J. Geophys. Res. 1968. V. 73, No. 24. P. 7609.
- 5. Tyler G. L., Simpson R. A. // Radio Sci. 1970. V. 5, No. 2. P. 263.
- 6. Tyler G. L., Howard H. T. // J. Geophys. Res. 1973. V. 78, No. 23. P. 4852.
- 7. Nozette S., Lichtenberg C. L., Spudis P., et al. // Science. 1996. V. 274, No. 5 292. P. 1 495.
- 8. Яковлев О.И., Ефимов А.И. // Докл. АН СССР. 1967. Т. 174, № 3. С. 583.
- 9. Яковлев О.И., Ефимов А.И., Матюгов С.С. // Космич. исслед. 1968. Т. 6, № 3. С. 432.
- 10. Tyler G. L., Eshleman V. R., Fjeldbo G., et al. // Science. 1967. V. 157, No. 3785. P. 193.
- Матюгов С. С., Яковлев О. И., Грицайчук Б. Г. // Радиотехника и электроника. 1971. Т. 16, № 9. С. 1545.
- 12. Tyler G. L. // Nature. 1968. V. 219. P. 1243.
- 13. Moore H. J., Tyler G. L., Boyce J. M., et al. // U. S. Geological Survey Open file Rep. 1975. P. 75.
- 14. Moore H. J., Tyler G. L., Boyce J. M., et al. // U. S. Geological Survey Open file Rep. 1976. P. 76.
- Зайцев А. Л., Каевицер В. И., Кучерявенков А. И. и др. // Радиотехника и электроника. 1977. Т. 22, № 10. С. 2097.
- 16. Patterson G. W, Stickle A. M., Turner F. S., et al. // Icarus. 2016. V. 283. P. 2.
- 17. Смирнов В. М., Юшкова О. В., Марчук В. Н. и др. // Радиотехника и электроника. 2013. Т. 58, № 9. С. 926.
- Heiken G., Vaniman D., French B. M. Lunar Sourcebook: A User's Guide to the Moon. New York: Cambridge University Press, 1991. 736 p.
- 19. Юшкова О.В., Кибардина И.Н. // Астрон. вестник. 2017.№ 2. С. 136.
- 20. Кибардина И. Н., Юшкова О. В. // Космич. исслед. 2017. № 3. С 201.
- 21. Ржевский В.В., Шварев В.В., Силин А.А. и др. // Космич. исслед. 1976. Т. 14, вып. 2. С. 187.
- 22. Olhoeft G. R., Strangway D. W. // Earth Planetary Sci. Lett. 1975. V. 24. P. 394.
- 23. Simpson R. A. // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 1993. V. 31, No. 2. P. 465.
- 24. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1973. 720 с.

Поступила в редакцию 2 ноября 2016 г.; принята в печать 30 мая 2017 г.

DETERMININNG THE COMPLEX DIELECTRIC PERMITTIVITY OF GROUND DIELECTRIC PERMITTIVITY IN THE BISTATIC RADAR REGIME

O. V. Yushkova and V. V. Yuhkov

We discuss the possibility of determining the dielectric properties of the moon soil using the bistatic radar method. Analytical formulas are presented, which allows one to find the complex dielectric permittivity of the ground basing on the measured values of the Brewster angle and the reflection coefficient of a vertically polarized wave. The conditions for the one-to-one correspondence of the Brewster angle values and the dielectric properties of the soil are considered.