

Особенности отражения радиоволн от слоя реголита

О.В. Юшкова, И.Н. Кибардина, Л.П. Исаева

*Институт радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН, Фрязинская часть,
o.v.y@mail.ru*

В работе обсуждаются особенности отражения радиоволн от приповерхностного слоя Луны в режимах бистатической и моностатической локации.

Features of radio waves reflection from the lunar surface layer are discussed for bistatic and monostatic locations.

В 2007 г. было объявлено о старте российской программы освоения Луны и окололунного пространства «Луна-Глоб». Изучение состава и физико-химических свойств лунного реголита декларируются этой программой как отдельное направление. Оценка плотности и мощности реголита интересна как с практической, так и с геологической точки зрения. Для практики важно, что в реголите сосредоточены наиболее перспективные лунные ресурсы – металлы (Al, Ti, Fe и т.д.), редкоземельные элементы, благородные газы, включая гелий-3. Их процентное содержание тем выше, чем толще слой реголита и старше поверхность. Такой реголит называют зрелым, он плотнее, чем в геологически - активных районах и отражает процессы взаимодействия с солнечным ветром. С геологической точки зрения реголит является индикатором, так как характеристики реголита зависят от происхождения и истории рельефа. Оценка мощности реголита в различных геологических ситуациях позволяет выявить возраст, морфологию и историю рельефа.

Активная радиолокация - один из немногих дистанционных методов, с помощью которых можно исследовать структуру и диэлектрические свойства приповерхностного слоя. В основе радиолокации лежит способность радиоволн отражаться от границ между геологическими породами с разными диэлектрическими свойствами. Сигналы, отраженные от поверхности и от внутренних границ сдвинуты на время, необходимое на распространение радиоволн от поверхности до границы отражения и обратно. Измеряемыми величинами являются отношение напряженности поля отраженного сигнала E_s и излученного сигнала E_0 . Вектор $R = \frac{E_s}{E_0}$ называется коэффициентом

отражения и зависит от параметров волны (частоты, поляризации, угла падения) и свойств отражающего грунта (диэлектрической проницаемости, наличия внутренних границ, плотности). Разработаны методы решения обратных задач радиолокационного зондирования, позволяющие по измеренному коэффициенту отражения восстановить глубинное распределение диэлектрических характеристик грунта [например 1,2], при этом диэлектрическая проницаемость и поглощение зависят от плотности пород и их минералогического состава, температуры на поверхности. Именно распределение плотности пород по глубине, примерный химический состав грунта с точной координатной привязкой к местности является ценной информацией, необходимой для выбора мест посадок и планирования расположения стационарных баз. Радиолокационные измерения можно проводить в режимах моностатической локации и бистатической локации. В первом режиме приемник и передатчик совмещены и установлены либо на спутнике, либо на Земле, измерения проводятся в строго определенном районе и, как правило, используется широкополосный сигнал. Во втором режиме приемник расположен на Земле, передатчик - на спутнике или наоборот. Для

радиозондирования используется монохроматический сигнал, часто - разной поляризации. Параметры грунта восстанавливают по массиву результатов измерений, проведенных над конкретным районом при различных углах падения радиоволн и желательно для нескольких частотных диапазонов.

Модель грунта.

Лабораторные исследования образцов лунного грунта, доставленные в ходе миссий «Аполло» и «Луна» сделали возможным детальное изучение его химического состава и физических свойств в лабораторных условиях на Земле. В рамках этих программ были изучены образцы различных типов грунтов из 9 посадочных мест в центральной части видимого полушария Луны. Наиболее полные обзоры исследований представлены в [3-6]. Согласно им породы верхнего слоя лунного грунта делятся на четыре группы:

- 1) реголит, который покрывает лунную поверхность за исключением, возможно, некоторых очень крутых склонов, стенок кратеров и лавовых каналов.
- 2) базальтовые вулканические породы лунных морей;
- 3) менее плотные и более светлые по сравнению с базальтами, слагающие лунные высокогорья; они относятся к анортозитовому ряду;
- 4) брекчии – сложные породы, сформированные из нескольких типов лунного грунта путем спекания в результате падения метеоритов;

Грунты второй и третьей группы называют коренными. По плотности они строго отличаются от верхнего слоя реголита. Плотность легких верхних пород может иметь значение от 0,8 до 2 г/см³, причем значение 0,8 г/см³ следует рассматривать как минимальное значение плотности верхнего слоя лунного реголита [6]. Разграничение пород по плотности было сделано в работе [7], где проведен обобщающий анализ диэлектрических свойств более 100 образцов лунного грунта. Там же показано, что диэлектрическая проницаемость реголита $\varepsilon_1 = \varepsilon_1' + i\varepsilon_1'' = \varepsilon_1'(1 + itg\delta_1)$ отличается от диэлектрической проницаемости коренных пород: для реголита $\varepsilon_1' \approx 2 \div 3$, $tg\delta_1 \approx 10^{-2} \div 5 \cdot 10^{-3}$, для коренных пород морей и материковой области Луны диэлектрическая проницаемость изменяется в диапазоне $\varepsilon_2' \approx 7 \div 15$.

Толщина слоя реголита l - самый неопределенный параметр модели. Она оценивается по данным радарных измерений, проведенных КА «Галилео», «Клементина», «Лунар Проспектор» и «Смарт-1». Вариации толщин в морях лежат в пределах 1,5 – 18,0 метров.

Коэффициент отражения радиоволн от грунта Луны

Распространение радиоволн в грунте и их отражение на границах раздела геологических сред описывается уравнением Гельмгольца. С учетом условий неразрывности его решений в грунте и на поверхности выводятся формулы для расчета коэффициента отражения радиоволн вертикальной и горизонтальной поляризаций:

$$R_v = \frac{R_{01v} + R_{12v} \exp(4\pi i f l \sqrt{\varepsilon_1} \sqrt{1 - \sin^2 \eta / n_1^2} / c)}{1 + R_{01v} R_{12v} \exp(4\pi i f l \sqrt{\varepsilon_1} \sqrt{1 - \sin^2 \eta / n_1^2} / c)},$$

$$R_h = \frac{R_{01h} + R_{12h} \exp(4\pi i f l \sqrt{\varepsilon_1} \sqrt{1 - \sin^2 \eta / n_1^2} / c)}{1 + R_{01h} R_{12h} \exp(4\pi i f l \sqrt{\varepsilon_1} \sqrt{1 - \sin^2 \eta / n_1^2} / c)},$$

где f (Гц) - частота электромагнитной волны,

η - угол ее падения на границу «вакуум-реголит»;

R_{01h} , R_{12h} - коэффициенты Френеля горизонтально поляризованной волны соответственно на верхней и нижней границе слоя;

R_{01v} , R_{12v} - соответствующие коэффициенты Френеля вертикально поляризованной волны. Коэффициенты задаются соотношениями:

$$R_{01v} = \frac{\sqrt{\varepsilon_1} \cos \eta - \cos \gamma_1}{\sqrt{\varepsilon_1} \cos \eta + \cos \gamma_1}, \quad R_{12v} = \frac{\sqrt{\varepsilon_2} \cos \gamma_1 - \sqrt{\varepsilon_1} \cos \gamma_2}{\sqrt{\varepsilon_2} \cos \gamma_1 + \sqrt{\varepsilon_1} \cos \gamma_2},$$

$$R_{01h} = \frac{\cos \eta - \sqrt{\varepsilon_1} \cos \gamma_1}{\cos \eta + \sqrt{\varepsilon_1} \cos \gamma_1}, \quad R_{12h} = \frac{\sqrt{\varepsilon_1} \cos \gamma_1 - \sqrt{\varepsilon_2} \cos \gamma_2}{\sqrt{\varepsilon_1} \cos \gamma_1 + \sqrt{\varepsilon_2} \cos \gamma_2},$$

где углы γ_1 и γ_2 определяются согласно закону Снеллиуса $n_1 \sin \gamma_1 = \sin \eta$ и

$$n_2 \sin \gamma_2 = n_1 \sin \gamma_1, \text{ откуда } \cos \gamma_1 = \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \eta}{n_1^2}}, \quad \cos \gamma_2 = \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \eta}{n_2^2}}.$$

Комплексные функции R_v и R_h зависят от двух переменных f , η и пяти параметров грунта ε'_1 , ε''_1 , ε'_2 , ε''_2 , l . При вертикальном падении, что наблюдается, как правило, в случае моностатической локации, коэффициенты отражения электромагнитных волн вертикальной и горизонтальной поляризации совпадают, а частота меняется в некотором диапазоне, т.е. коэффициент отражения является функцией частоты. В случае бистатической локации частота f постоянна, но измерения проводятся для нескольких углов падения η_i , т.е. коэффициенты отражения являются функцией угла. На рисунках 1 и 2 приведены результаты расчетов коэффициента отражения в зависимости от частоты (рис.1) и от угла наблюдения (рис.2). И в том, и в другом случае коэффициенты имеют общие свойства:

1. Функции $|R_v|$ и $|R_h|$ - осциллирующие и по переменной f (рис.1), и по переменной η (рис.2);

2. Максимумы функций $|R_v|$ и $|R_h|$ определяются соотношением $2fl \operatorname{Re}(\sqrt{\varepsilon_1}) \sqrt{1 - \sin^2 \eta / n_1^2} / c = k$, минимумы $2fl \operatorname{Re}(\sqrt{\varepsilon_1}) \sqrt{1 - \sin^2 \eta / n_1^2} / c = m + 1/2$, где k и m - целые числа.

3. Если величина мала $l / \lambda \rightarrow 0$, радиоволны отражаются от внутренней границы «не замечая» слоя, если она велика $d / \lambda \rightarrow \infty$, то отражение радиоволны происходит от поверхности, не проникая вглубь.

Анализ изменений коэффициента отражения в зависимости от частоты и угла падения дает возможность определить характеристики отражающей среды, т.е. решить обратную задачу.

Работа выполнена при частичной поддержке Программы №9 фундаментальных исследований Президиума РАН "Экспериментальные и теоретические исследования объектов Солнечной системы и планетных систем звезд".

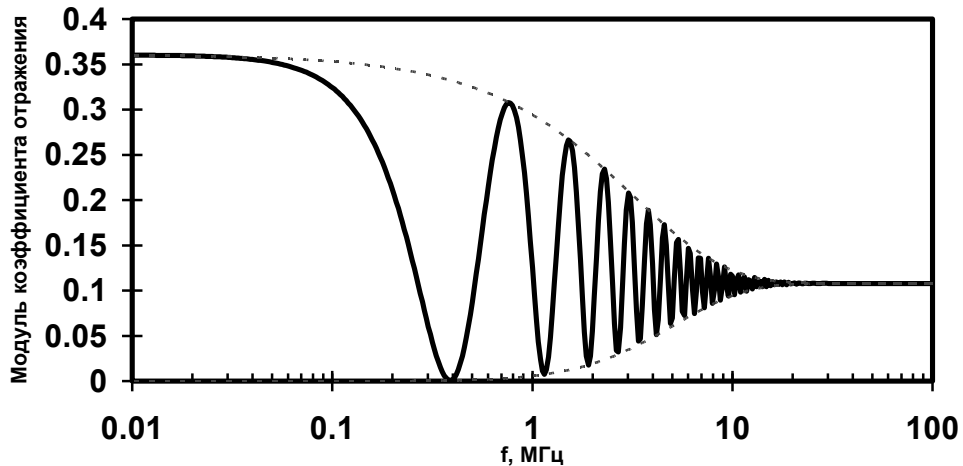


Рис.1. Зависимость модуля коэффициента отражения от частоты, $\eta = 0$.

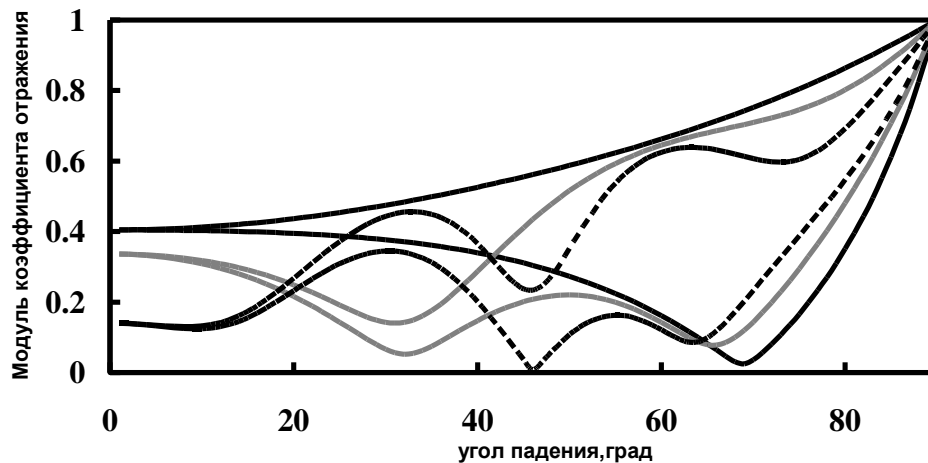


Рис.2. Зависимость модуля коэффициента отражения вертикально и горизонтально поляризованных волн. Для частоты $f_1=10\text{МГц}$ - сплошная черная линия, $f_2=50\text{МГц}$ - пунктирная, $f_3=100\text{МГц}$ - серая. Верхние кривые - горизонтальная поляризация, нижние - вертикальная.

Литература

1. Арманд Н.А., Андрианов В.А., Штерн Д.Я. Способ определения диэлектрической проницаемости грунта планеты // Бюллетень изобретений, патент № 2002272, 1993, №40, с.152.
2. Юшкова О.В., Восстановление параметров слоистой среды/ Изв. ВУЗов, Радиофизика, том 38, N 7, 1995, с. 648-652.
3. Heiken G., Vaniman D and French B M [Lunar Sourcebook: A User's Guide to the Moon](#) // Cambridge University Press, 1991, 736 p.
4. Черкасов И. И., Шварев В. В. Грунт Луны, М., Наука, 1975, 144 с.
5. Грунт из материкового района Луны // под ред. В. Л. Барсуков, Ю. А. Сурков. М.: Наука, 1979. 708 с.
6. Лунный грунт из Моря Кризисов, М., Наука, 1980, 360 с
7. Olhoeft G.R., Strangway D. W. Dielectric properties of the first 100 meters of the Moon// Earth and Planetary Science Letters, 1975 V. 24, P. 394 – 404.