

Комплексивность радиометодов в исследовании грунта Луны

О.В. Юшкова, И.Н. Кибардина

*Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН
141190 Фрязино, пр. Введенского, 1.*

E-mail: o.v.y@mail.ru

Обоснована необходимость сочетания радиолокации и СВЧ-радиометрии в исследовании приповерхностного грунта Луны.

Ключевые слова: радиолокация, радиометрия, Луна, грунт

Combining Radio Methods in the Study of the Moon's Soil

O.V. Yushkova, I.N. Kibardina

Fryazino Branch of Kotelnikov's Institute of Radio Engineering and Electronics.

The need for a combination of radar and microwave radiometry in the study of the subsurface of the Moon is substantiated.

Keywords: radar, radiometry, Moon, soil

Введение

Радиофизические методы исследования грунта основаны на том, что радиоволны, взаимодействуя с поверхностью, грунтом или атмосферой планеты, ее спутника или астероида меняют свои параметры. Эти изменения зависят от свойств среды, в частности, от минералогического состава, структуры и температуры. Измерения можно проводить в пассивном и активном режимах: в первом случае радиоволны генерируются искусственно, во втором случае исследуются радиоволны естественного происхождения. И в первом, и во втором случае радиоаппаратурой фиксируются изменения амплитуды и фазы радиосигнала. По регистрируемым изменениям сигнала можно восстановить свойства среды, с которой эти сигналы взаимодействовали. Численное моделирование, опирающееся на известные теоретические положения радиофизики, позволяет спрогнозировать результаты натуральных измерений, подобрать возможные свойства среды, выбрать наиболее подходящие параметры радиосигналов и оптимальные методы для их обработки.

Радиоисследования лунного грунта

Одна из основных задач космических кампаний развитых стран — изучение и освоение Луны. Для строительства стационарных баз, их жизнеобеспечения и организации коммуникационной инфраструктуры необходимы знания о строении и минералогическом составе лунного грунта. Получить эту информацию можно в результате исследования поверхностного слоя радиометодами.

Радиолокация грунта, один из активных дистанционных методов исследования космических тел, позволяет изучать слои верхнего покрова Луны толщиной до 10 длин волны радиосигнала радара орбитального базирования [1]. На рис.1 приведена зависимость модуля коэффициента отражения радиоволн от грунта Луны, моделируемого в рамках задач радиолокации грунта Луны для разных температур на ее поверхности. При расчетах использована электрофизическая модель лунного грунта,

построенная на основе анализа результатов лабораторных исследований, опубликованных в открытой печати [2]. Модель позволяет рассчитать глубинный профиль диэлектрической проницаемости и тангенса потерь пород лунного грунта, в ней учтены следующие характеристики:

- частота электромагнитного поля;
- температура на поверхности Луны (от 25°К до 400°К [3]);
- толщина и плотность слоя реголита, лежащего на материнской платформе из коренных пород;
- толщина теплоизоляционного слоя (породы под ним имеют среднюю температуру, по оценкам равную 240-250 °К).

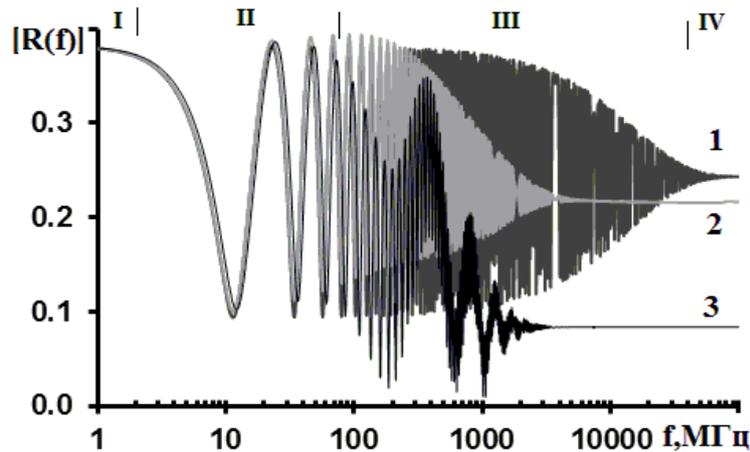


Рис. 1 Частотная зависимость коэффициента отражения (температура на поверхности 380 К - линия 1, 150 К – 2, 80 К – 3).

Коэффициент отражения радиоволн от моделируемого грунта рассчитывается на базе волнового уравнения. Для этого моделируемый профиль диэлектрической проницаемости для определенной температуры на поверхности делится на N слоев (рис.2), толщина которых соизмерима с 0.1 длины соответствующей радиоволны.

Для каждого слоя диэлектрическая проницаемость ϵ_j – постоянна. В этом случае решение волнового уравнения в пределах j слоя имеет вид:

$$Y_j = T_j e^{-ikz\sqrt{\epsilon_j}} + R_j e^{ikz\sqrt{\epsilon_j}} \quad (1)$$

В формуле (1) k – волновое число, T_j – коэффициент прохождения через границу z_j , R_j – коэффициент отражения от границы z_{j+1} . В верхнем полупространстве решение волнового уравнения принимает вид $Y_0 = e^{-ikz} + R(f)e^{ikz}$; в нижнем слое коэффициент отражения отсутствует и $R_N = 0$, $Y_N = T(f)e^{-ikz\sqrt{\epsilon_N}}$. Обозначим $R(f)$ – коэффициент отражения от поверхности, $aT(f)$ – коэффициент прохождения через весь неоднородный слой. На всех границах между слоями z_j выполняются условия неразрывности для Y_j (1) и первой производной решения Y'_j , которые позволяют определить коэффициенты $R(f)$ и $T(f)$. Запишем условия неразрывности на последней границе z_N :

$$\begin{cases} T_{N-1} e^{-ikz_N\sqrt{\epsilon_{N-1}}} + R_{N-1} e^{ikz_N\sqrt{\epsilon_{N-1}}} = T(f) e^{-ikz_N\sqrt{\epsilon_N}} \\ \frac{\sqrt{\epsilon_{N-1}}}{\sqrt{\epsilon_N}} (-T_{N-1} e^{-ikz_N\sqrt{\epsilon_{N-1}}} + R_{N-1} e^{ikz_N\sqrt{\epsilon_{N-1}}}) = -T(f) e^{-ikz_N\sqrt{\epsilon_N}} \end{cases} \quad (2)$$

Из системы (2) следует, что коэффициенты R_{N-1} и T_{N-1} связаны соотношениями:

$$R_{N-1} = [r_{N-1N} e^{-2ikz_N \sqrt{\epsilon_{N-1}}}] T_{N-1}. \quad (3)$$

В формуле (3) $r_{N-1N} = (\sqrt{\epsilon_N} - \sqrt{\epsilon_{N-1}}) / (\sqrt{\epsilon_N} + \sqrt{\epsilon_{N-1}})$ – коэффициент отражения Френеля от границы z_N . Далее запишем условия неразрывности на границе z_{N-1}

$$\begin{cases} T_{N-2} e^{-ikz_{N-1} \sqrt{\epsilon_{N-2}}} + R_{N-2} e^{ikz_{N-1} \sqrt{\epsilon_{N-2}}} = T_{N-1} e^{-ikz_{N-1} \sqrt{\epsilon_{N-1}}} + R_{N-1} e^{ikz_{N-1} \sqrt{\epsilon_{N-1}}} \\ \frac{\sqrt{\epsilon_{N-2}}}{\sqrt{\epsilon_{N-1}}} (-T_{N-2} e^{-ikz_{N-1} \sqrt{\epsilon_{N-2}}} + R_{N-2} e^{ikz_{N-1} \sqrt{\epsilon_{N-2}}}) = -T_{N-1} e^{-ikz_{N-1} \sqrt{\epsilon_{N-1}}} + R_{N-1} e^{ikz_{N-1} \sqrt{\epsilon_{N-1}}} \end{cases} \quad (4)$$

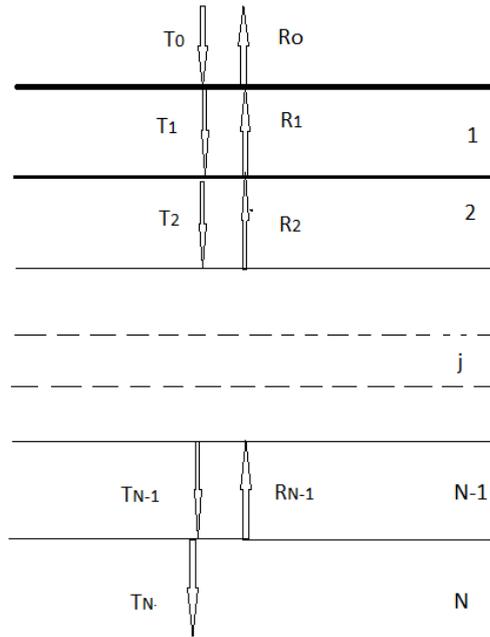


Рис. 2. Модель слоя для расчета коэффициента отражения радиоволн.

Решая систему (4), получим что и здесь коэффициенты R_{N-2} и T_{N-2} связаны линейно:

$$R_{N-2} = T_{N-2} \left[e^{-2ikz_{N-1} \sqrt{\epsilon_{N-2}}} \cdot \frac{r_{N-2N-1} + r_{N-1N} e^{2ik\sqrt{\epsilon_{N-1}}(z_{N-1} - z_N)}}{1 + r_{N-2N-1} r_{N-1N} e^{2ik\sqrt{\epsilon_{N-1}}(z_{N-1} - z_N)}} \right]. \quad (5)$$

Для удобства записи выражения (5) представим $R_j = V_j T_j$ для $j = 0, 1, \dots, N$ и получим:

$$\begin{aligned} V_N &= 0, \quad R_N = 0, \quad T_N = T(f) \\ V_{N-1} &= \frac{r_{N-1N} + V_N}{1 + r_{N-1N} V_N} \cdot e^{2ik\sqrt{\epsilon_{N-1}}(z_{N-1} - z_N)}, \\ V_{N-2} &= \frac{r_{N-2N-1} + V_{N-1}}{1 + r_{N-2N-1} V_{N-1}} \cdot e^{2ik\sqrt{\epsilon_{N-2}}(z_{N-2} - z_{N-1})}, \\ V_0 &= \frac{r_{01} + V_1}{1 + r_{01} V_1} \cdot e^{2ik\sqrt{\epsilon_0}(z_0 - z_1)}. \end{aligned}$$

В этих обозначениях условия на границах будут иметь вид:

$$R_{N-1} = T_{N-1} V_{N-1} e^{-2ik\sqrt{\epsilon_{N-1}} z_{N-1}},$$

$$R_{N-2} = T_{N-2} V_{N-2} e^{-2ik\sqrt{\epsilon_{N-2}}z_{N-2}} \text{ и т.д.}$$

Так, поднимаясь от слоя к слою и учитывая, что $T_0 = 1$, получим формулу для определения комплексного коэффициента отражения $R(f)$ на частоте f от слоя неоднородного грунта:

$$R(f) = V_0 = \frac{r_{01} + V_1}{1 + r_{01} V_1} = \frac{r_{01} + \frac{r_{12} + V_2}{1 + r_{12} V_2} e^{2ik\sqrt{\epsilon_1}(z_1 - z_2)}}{1 + r_{01} \frac{r_{12} + V_2}{1 + r_{12} V_2} e^{2ik\sqrt{\epsilon_1}(z_1 - z_2)}} \quad (6)$$

Анализ расчетов частотной зависимости коэффициента отражения (6) показал, что для радиоволн, частоты которых меньше 1 МГц (область I на рис.1) слой реголита – прозрачен, т. е. волны взаимодействуют с коренными (материнскими) породами, находящимися при постоянной температуре. От температуры не зависит и взаимодействие с грунтом радиоволн, частоты которых находятся в диапазоне от 1 до ~ 100 МГц, но на распространение волн этого радиодиапазона существенно влияет структура грунта. На рис.1 частоты этих волн находятся в области II. Амплитуда осцилляций графика зависит от градиента диэлектрических параметров грунта на границах слоев, а частота повторения – от толщины этих слоев. Тепловые условия на поверхности грунта существенно влияют на распространение волн на частотах выше 100 МГц (области III и IV). При этом радиоволны, частоты которых выше 10 ГГц, взаимодействуют только с поверхностью.

Сгенерировать, а затем принять столь широкополосный радиосигнал одним прибором, затем выделить частотную зависимость коэффициента отражения радиоволн от грунта в широком диапазоне не представляется возможным. Для исследования свойств грунта радиочастотами участков I, II и III имеет смысл использовать радары подповерхностного зондирования, для радиочастот области IV – радиометры, так как при активной локации грунта на этих частотах будет преобладать рассеяние радиоволн рельефом. Возможность восстановления глубинного профиля диэлектрической проницаемости лунного грунта на основе измерений радиометра показана практически. Микроволновые радиометры с четырьмя частотными каналами 3.0, 7.8, 19.35 и 37 ГГц измеряли радиояркостную температуру поверхности Луны в течение китайских миссий CE1 (2007 г) и CE2 (2010 г). Яркостная температура, измеряемая радиометрами, определяется диэлектрическими характеристиками поверхностного слоя, которые зависят от температуры грунта. На основе измерений яркостной температуры, выполненных в рамках этих миссий, были восстановлены диэлектрическая проницаемость и тангенс угла потерь для участка измерения Аполлона 15 и экваториального нагорья (участки нагорья были выбраны в пределах широты $\pm 0,5^\circ$ и долготы от -180° до -75° и от 100° до 180°) [3]. Для обратной задачи были использованы натурные измерения температуры приповерхностного слоя до глубины ~ 1 м [4]. Для восстановленных диэлектрических параметров обнаружено, что максимальная глубина проникновения излучения на участке Аполлона 15 колеблется примерно от 30 см на 37 ГГц до 230 см для 3,0 ГГц и от 30 см при 37,0 ГГц до 560 см при 3,0 ГГц в экваториальном нагорье. Восстановленные по данным радиометрии диэлектрические проницаемости с учетом предполагаемого изменения температуры в грунте, определяют коэффициент отражения радиоволн для частотного диапазона IV. Существуют методики, позволяющие по коэффициенту отражения радиоволн, известному в широком частотном диапазоне определить глубинное распределение диэлектрической проницаемости грунта, например, подробно описанная в работе [5].

Выводы

Таким образом, располагая радары, работающие в нескольких частотных диапазонах и радиометр на одном летном носителе, можно провести измерения, позволяющие полно и точно оценить отражательные свойства приповерхностного слоя грунта, восстановить по глубине его диэлектрические характеристики для разных температур поверхности, а затем предсказать его минералогический состав, основываясь на лабораторных измерениях характеристик доставленных на Землю образцов лунных пород.

Работа выполнена в рамках Государственного задания ИПЭ им В.А. Котельникова РАН.

Литература

1. Яковлев О.И. Космическая радиофизика. // М.: РФФИ, 1998. 432 с.
2. Юшкова О.В., Кибардина И.Н., Дымова Т.Н. Электрофизическая модель грунта Луны. // *Астрономический вестник*, 2020, Т. 54, № 6, С. 520–528. doi:10.31857/S0320930X20060067.
3. Gong X., Paige D.A., Seigler M.A., Jin Y.Q. Inversion of dielectric properties of the lunar regolith media with temperature profiles using Chang'e microwave radiometer observations // *IEEE Geoscience and remote sensing letters*, 2015. V. 12, № 2, P. 384-388. doi:10.1109/LGRS.2014.2343617.
4. Langseth M.G., Keihm S.J., Peters K. Revised Lunar Heat-Flow Values. // *Proceedings Lunar and Planetary Science Conference*. 1976. V. 7. P. 3143–3171.
5. Арманд Н.А., Андрианов В.А., Штерн Д.Я. Способ определения диэлектрической проницаемости грунта планеты. // *Бюллетень изобретений*. Патент № 2002272. 1993, № 40, С.152.