

Оценка предельной глубины зондирования грунта Луны радарми космического базирования

В.Н.Марчук¹, О.В.Юшкова¹

¹ Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

141190 г. Фрязино Московской обл., пл. Введенского, д.1.

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

Рассмотрены причины необходимости оценки предельной глубины зондирования при работе длинноволновых радаров над поверхностью Луны. Приведены формулы для расчетов, обсуждаются результаты определения толщин слоев доступных для изучения методом радиозондирования.

Ключевые слова: Луна, радары, диэлектрическая проницаемость, грунт, глубина радиозондирования

Estimation of the maximum depth of lunar soil sounding from the spacecraft

V.N. Marchuk¹, O.V. Yushkova¹

¹ V.A. Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics RAS, Fryazino Branch.

The paper considers the reasons for the need to estimate the maximum depth of sounding when operating long-wave radars over the lunar surface. Formulas for calculations are given, the results of determining the thicknesses of layers available for study by radiosonding are discussed.

Keywords: the Moon; radar; dielectric constant; soil; maximum depth of lunar soil

Введение

По сих пор в космосе подповерхностное радиозондирование является практически единственным доступным средством определения внутренней структуры космических тел. Так как исследование Луны с целью последующей колонизации на данный момент является наиболее актуальной задачей практически для всех космических агентств (США, ЕС, Индия, Китай, Япония, Израиль, Южная Корея, РФ), на многих орбитальных модулях планируется установка длинноволновых радаров. Цель экспериментов – определение строения и состава грунта, прогноз наличия полезных ресурсов, в том числе криолитосферных, поиск естественных внутренних полостей (лавовых трубок), оценка их объема. Для поиска лавовых трубок и, возможно, залежей льда.

Идея разработки радиоаппаратуры для специализированного исследования космических тел была реализована в 1990 г.: специалисты ИРЭ РАН (г. Фрязино) в кооперации с специалистами института Макса Планка (Германия) начали разработку бортового радиолокационного комплекса в космической программе "Марс-94/96" [1]. Предполагалось проведение исследования верхнего покрова Марса, поиск воды в замерзшем виде на глубинах до 500 метров. Накопленный опыт был впоследствии частично использован зарубежными коллегами при создании радара «MARSIS» в рамках проекта «МАРС-ЭКСПРЕСС» Европейского космического агентства [2]. С помощью данного прибора были получены данные о структуре полярных областей Марса. На радарограммах хорошо видно слоистое строение полярной шапки планеты

[2]. Следующий орбитальный радар «SHARAD», доставленный к Марсу космическим аппаратом «Mars Reconnaissance orbiter» (NASA) [3], предназначенный для подповерхностного зондирования Марса работал в диапазоне частот от 15 до 25 МГц. На его радарограммах хорошо видны ложе ледника, пласт материнского (постоянного) льда, слои сезонного изменения полярной шапки. Общая толщина слоя, доступного для изучения радиолокационными методами, оценивается в 3 км. Полученные результаты находятся в согласии с модельными представлениями о покрове Марса и наглядно демонстрируют возможности радаров подповерхностного зондирования.

Предположение о наличии подповерхностных пустот в грунте Луны было выдвинуто после обработки эксперимента, выполненного в 2011 – 2012 гг. связкой двух аппаратов "GRAIL" (NASA), предназначенных для изучения гравитационного поля. По результатам их пролетов был сделан вывод, что лунная кора имеет толщину 35-40 км, а не 45-60 км, как предполагалось ранее; кроме того, кора может содержать множество подповерхностных пустот и объемных трещин, заполненных лавой (даек) [3]. В 2007 году состоялся полет КА "Kaguya" (JAXA) [4]. Основная цель миссии состояла в выполнении радиолокационных экспериментов с орбиты Луны: станция была снабжена высокочастотным радаром для исследования плазменной оболочки и низкочастотным радаром Lunar Radar Sounder. Радар LRS предназначался для исследования поверхности и подповерхностных структур ЛЧМ сигналом с центральной частотой 5 МГц. Частотный диапазон радара LRS оказался слишком высоким для изучения толщины лунной коры, ее нижней границы достичь не удалось. В то же время для детального по глубине исследования приповерхностного слоя не имелось достаточного разрешения из-за ограниченной полосы частот в выбранном диапазоне. Тем не менее, результаты комплексной обработки всех измерений радара КА "Kaguya" показали, что в поверхностном слое Луны присутствуют пустоты, образование которых можно объяснить вулканической активностью недр Луны в прошлом. Если гипотеза верна, обнаруженные пустоты можно сравнивать с лавовыми трубками, существующими на Земле, которые образуются из-за того, что при остывании на поверхности расплавленной лавы при ее остывании образуется теплоизолирующая корка, защищающая находящийся под ней расплав от дальнейшего остывания, вызванного потерями энергии на тепловое излучение или контактом с воздухом. В результате лава под коркой остается вязкой и продолжает стекать под уклон, даже после того, как извержение вулкана завершилось, оставляя под коркой пустоты различной формы. То есть, лавовая трубка - это разновидность лавовой пещеры, иногда очень большого объема. Наличие пещер под поверхностью Луны позволит создать достаточно защищенные от внешних воздействий лунные базы. Идентификацию районов, в которых внутренние полости существуют, можно провести только с помощью длинноволновых радаров космического базирования; поэтому оценка предельной глубины зондирования является ключевым моментом в планировании и интерпретации результатов натурных экспериментов.

Постановка задачи

Кроме прогноза толщины слоя грунта, доступного для изучения с помощью радара, расчет предельной глубины зондирования необходим и для определения длительности развертки сигнала: временного интервала, в течение которого будет производиться дискретизация принимаемых радиолокационных данных, отраженных от объектов, находящихся под поверхностью Луны. Для этого будем рассматривать наиболее оптимальные условия распространения радиосигнала: с минимальными потерями в грунте, отсутствием влияния шероховатости поверхности, идеальным отражающим объектом с коэффициентом отражения, близким к единице. Затем мы попытаемся

оценить, какой реальной глубины удастся достичь в случае наиболее вероятных условий зондирования. со средними значениями шероховатости и поглощения.

В первом приближении предельная глубина зондирования d_{max} может быть определена как расстояние на котором величина прошедшего сигнала уменьшилась в e раз, что задается соотношением [5] :

$$d_{max} = \frac{1}{(2\pi f_{max}/c)\sqrt{\varepsilon'}\sqrt{[\sqrt{1+\operatorname{tg}^2\delta}-1]}/2} \quad (1)$$

где f_{max} – верхняя граница частотного диапазона, ε' – действительная часть диэлектрической проницаемости грунта, $\operatorname{tg} \delta$ – тангенс угла потерь, характеризующий затухание радиосигнала в грунте, c – скорость распространения радиоволн в вакууме. Из соотношения следует, что для достижения больших глубин нужно переходить в область более низких частот: чем ниже частота, тем больше глубина зондирования. С другой стороны, разрешающая способность (т.е. минимальное расстояние по глубине, на котором могут быть различимы два отражающих объекта или их детали) δh определяется шириной полосы Δf зондирующего сигнала [6], и с учетом двойного прохождения волны в слое рассчитывается по формуле:

$$\delta h = \frac{c}{(4\Delta f)\sqrt{\varepsilon'}} \quad (2)$$

Однако в приведенных расчетах не учитывается мощность передатчика радара, чувствительность приемника, влияние шумов окружающего пространства. Ниже приведем уточненные формулы расчета.

Расчет предельной дальности (глубины зондирования) радара без потери общности можно разделить на два взаимодополняющих случая:

1. Отражение от поверхности, находящейся в дальней зоне радара, находящегося в воздухе или безвоздушном пространстве на высоте H от исследуемой поверхности.
2. Отражение от границы между слоями двух сред с различной диэлектрической проницаемостью.

В первом случае нет поглощения радиосигнала, однако здесь нужно учитывать потери на сферическую расходимость волны. Во втором случае можно в первом приближении рассматривать сигнал в виде плоской волны, но необходимо учитывать поглощение в среде, а если поглощение мало, то кратные отражения внутри слоя (слоев).

Оценка предельной дальности зондирования радара в воздухе (вакууме)

Уравнение, связывающее дальность H с мощностью передатчика P_t и мощностью отраженного сигнала на входе приемника P_r имеет вид [7]:

$$P_r = P_t \frac{G^2 \lambda^2}{64\pi^2 H^2 (1+H/r)^2} R_{01}^2 \quad (3)$$

где G – коэффициент усиления приемной и передающей антенны (при условии их идентичности), r – радиус кривизны поверхности, R_{01} – коэффициент отражения от гладкой поверхности для случая вертикального падения волны и немагнитной среды с диэлектрической проницаемостью ε_1 , определяется как

$$R_{01} = \frac{1-\sqrt{\varepsilon_1'}}{1+\sqrt{\varepsilon_1''}} \quad (4)$$

В общем случае, решая уравнение (3) относительно H получим

$$H_{max} = \sqrt{\frac{P_t G^2 \lambda^2}{P_L 64 \pi^2} R_{01}^2 + \frac{1}{4r^2}} - \frac{1}{2r} \quad (5)$$

где P_L - пороговое значение чувствительности приемника.

Как правило, отношение H/r много меньше единицы, поэтому им можно пренебречь и считать, что предельная дальность H_{max} :

$$H_{max} = \sqrt{\frac{P_t G^2 \lambda^2}{P_L 64 \pi^2} R_{01}^2} \quad (6)$$

Оценка предельной дальности зондирования радара в грунте

Отношение мощности сигнала P_{r2} , отраженного от границы слоя толщиной h , к мощности сигнала, отраженного от поверхности, для $H \gg h$ определяется соотношением

$$\frac{P_{r2}}{P_{r1}} = \frac{H^2}{(H+h)^2} \frac{R_{12}^2 (1-R_{01}^2)^2}{R_{01}^2} \exp(-2\pi f_{max} \tau_d \operatorname{tg} \delta) \quad (7)$$

где $\tau_d = 2h\sqrt{\varepsilon_1}/c$ – время распространения радиосигнала в слое, $\operatorname{tg} \delta$ - тангенс угла потерь верхнего слоя грунта, а коэффициент отражения от границы между верхним и нижним слоем грунта, имеющего диэлектрическую проницаемость ε_2 , определяется как

$$R_{12} = \frac{\sqrt{\varepsilon_1'} - \sqrt{\varepsilon_2'}}{\sqrt{\varepsilon_1'} + \sqrt{\varepsilon_2'}} \quad (8)$$

В случае, когда радар расположен на поверхности грунта, уравнение (7) упрощается

$$\frac{P_{r2}}{P_{r1}} = R_{12}^2 \exp(-2\pi f_{max} \tau_d \operatorname{tg} \delta) \quad (9)$$

Для радаров космического базирования как правило высота КА над поверхностью много больше глубины зондирования, следовательно сферической расходимостью радиоволн в грунте можно пренебречь и рассматривать отдельно потери мощности при распространении радиосигнала до поверхности и обратно по формуле (3) и потери мощности в грунт по формуле (7) при условии что отношение $H^2/(H+h)^2$ стремится к 1.

Предельный уровень сигнала, обнаруживаемый радаром, ограничивается уровнем шума приемного устройства P_n , который с учетом применения антенны с малой направленностью, определяется известными соотношениями:

$$P_n = kT_A \Delta f, \quad (10)$$

$$T_A = (1-\eta_A)T_0 + \eta_A T_{\text{я}} + (F-1)T_0, \quad (11)$$

где T_0 - температура элементов приемника, $T_{\text{я}}$ – температура шумов в заданном диапазоне частот, η_A – КПД антенны, F – фактор шума приемника.

Примем, что критерием обнаружения является превышение мощности сигнала над уровнем шумов в 10 раз. Тогда предельную глубину зондирования можно выразить как

$$h_{max} = \frac{c}{2\sqrt{\varepsilon}\omega t g \delta} \ln \left(\frac{R_{12}^2(1-R_{01}^2)}{R_{01}^2} \frac{P_r}{10P_n} \right) \quad (12)$$

В случае эллиптической орбиты космического аппарата придётся рассчитывать два предельных значения глубины зондирования: для перицентра и апоцентра.

Полученные результаты

В результате расчетов были получены предельные глубины для различных частот зондирования и параметров грунта. В расчетах предполагается, что мощность излучаемого радиосигнала равна 30 Вт. Данная величина является наиболее приемлемой для космического аппарата как для электромагнитной совместимости приборов, так и для соответствия ограничениям по энергопотреблению и рассеиванию тепловой мощности в условиях безвоздушного пространства. Коэффициент усиления антенны на низких частотах принимается равным 1.4 (электрический диполь), так как антенны с большей направленностью будут иметь габариты и вес, неприемлемые для установки на космический аппарат. Для более высоких частот есть возможность использовать направленные антенны с большим коэффициентом усиления с приемлемыми масс-габаритными значениями.

Рассчитывались несколько возможных положений космического аппарата над поверхностью Луны. Здесь приведены расчеты для высоты 100 км, как наиболее вероятной. Уменьшение высоты более благоприятно для работы радаров как увеличения потенциала принимаемого сигнала, так и для улучшения разрешения по поверхности, однако на малых высотах усложняется процесс вывода космического аппарата на орбиту.

Диэлектрическую проницаемость лунного грунта примем равной 18, что соответствует породам вулканического происхождения, например, базальту.

Для идеального случая зондирования примем коэффициент отражения от нижнего слоя близким к единице, поглощение в грунте минимальным: $tg\delta = 10^{-4}$ (Таблица 1).

Таблица 1. Предельная глубина зондирования для идеального случая зондирования

Формулы\Частоты, МГц	10	20	200	500	800	1000
Коэффициент усиления антенны	1.4	1.4	4	20	200	400
Пр.глубина по ф(1), м	23000	11000	1100	450	280	225
Пр.глубина по ф(12), м	26000	13000	5500	305	370	333
Разрешающая способность по глубине, м	35	18	0.7	0.3	0.1	0.09

Для реальных случаев зондирования примем коэффициент отражения от нижнего слоя равным 0,5, что соответствует отражению от воздушной полости, а поглощение в грунте ближе к ожидаемому $tg\delta = 10^{-3}$ (Таблица 2).

Таблица 2. Предельная глубина зондирования для реальных случаев зондирования

Формулы\Частоты, МГц	10	20	200	500	800	1000
Коэффициент усиления антенны	1.4	1.4	4	20	200	400
Пр.глубина по ф(1), м	2200	1100	110	45	28	23
Пр.глубина по ф(12), м	1900	900	17	15	27	26
Разрешающая способность по глубине, м	35	18	0.7	0.3	0.1	0.09

глубине, м						
------------	--	--	--	--	--	--

Выводы

В работе приведены результаты расчетов предельной глубины зондирования радаров подповерхностного зондирования для различных частотных диапазонов. Показано что глубина зондирования может быстро убывать с ростом частоты, однако, при использовании на высоких частотах направленных антенн, удастся достичь приемлемых значений предельной глубины зондирования.

Данные расчеты могут быть использованы при проектировании радиолокационных комплексов для исследования грунта Луны в будущих космических миссиях, в частности для радиолокационного комплекса РЛК-Л ближайшей планируемой миссии Луна-26.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН № 075-01133-22-00.

Литература

1. Смирнов В.М., Юшкова О. В., Марчук В.Н., Андреев В.Ю. Космические радиолокаторы подповерхностного зондирования грунта Марса и Луны. // Радиотехника и электроника. 2016. С. 122-129.
2. Picardi G., Plaut J.J., et al. Soundings of the Subsurface of Mars// Science. 2005. V.310. №5756. P.1925-1928 DOI: 10.1126/science.1122165
3. Phillips R.J., Zuber M.T, Smrekar S.E. et al. // Scienceexpress www.scienceexpress.org . 15 May 2008. P. 1182 . 10.1126/science.1157546
4. Kaku T., Haruyama J., Miyake W. et al. Detection of intact lava tubes at Marius Hills on the Moon by SELENE (Kaguya) lunar radar sounder // Geophysical Research Letters. 2017. V. 44. N10. P.155-161. [https://doi.org/ 10.1002/2017GL074998](https://doi.org/10.1002/2017GL074998)
5. Рекомендации Международного Союза Электросвязи // МСЭ_R P.527-4 от 06/2017
6. Яковлев О. И., Якубов В. П., Урядов В. П., Павельев А.Г. Распространение радиоволн // М., URSS, .2012. 496 с.
7. Справочник по радиолокации. Под ред.М.Сколника. Нью-Йорк, 1970. Пер с англ. (в четырех томах) под общей ред. К.Н.Трофимова. Т. 1. Основы радиолокации. Под ред.Я.С.Ицхоки. М. «Сов.радио» .1976. 456 с.