

Численное моделирование при интерпретации результатов радиолокационного зондирования грунта планет

Кибардина И.Н., Юшкова О.В., Смирнов В.М., Марчук В.Н.

Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН, Фрязино, Московская обл, Россия o.v.y@mail.ru

Представлены результаты численного моделирования энергетического спектра сигнала, отраженного от модели грунта Марса с учетом влияния ионосферы планеты. Параметры излученного линейно-частотно-модулированного сигнала соответствуют сигналу радиолокатора MARSIS, установленного на космическом аппарате «Марс-Экспресс». Приведено описание моделей грунта Марса и его ионосферы. Сопоставлены спектры моделируемого отраженного сигнала с экспериментальными данными, полученными при пролете КА над северной полярной шапкой Марса. Для экспериментальных данных радиолокации поверхности Марса для области полярной шапки получена оценка толщины слоя льда - 1000м.

Введение

Радиолокационные методы широко используются при исследованиях структуры грунта, ионосфер планет и малых тел Солнечной системы. При проведении радиофизических исследований с борта космического аппарата вопрос правильной интерпретации результатов радиолокационных измерений тесно связан с численным моделированием процесса распространения радиосигналов через ионосферу и их отражением от неоднородного грунта с шероховатой поверхностью. Сравнивая характеристики реального отраженного сигнала с результатами моделирования, можно оценить степень адекватности используемых моделей грунта и ионосферы (атмосферы) и скорректировать эти модели. В результате совместного анализа экспериментальных и моделируемых данных дополняется и корректируется представление о характеристиках поверхности космического тела, его подповерхностной структуре и о процессе распространения радиосигналов в этих средах.

Для подповерхностного зондирования грунта планет традиционно используют линейно-частотно-модулированные сигналы в диапазоне частот 0.1-100 МГц. Для этих частот можно построить модели диэлектрических параметров ионосферы и грунта космических тел на основе априорной информации. Ниже будем рассматривать сигналы, отраженные от относительно ровной поверхности при углах облучения, близких к нормали к отражающей поверхности. В этом случае площадь поверхности, существенная для отражения, соизмерима с первой зоной Френеля, и процесс отражения радиосигналов можно рассматривать в плоскостном приближении, а распространение волн описывать одномерным уравнением Гельмгольца. В работе приведены используемые модели диэлектрической проницаемости грунта и ионосферы Марса. Далее описаны результаты моделирования отражения линейно-частотно-модулированных сигналов радиолокатора MARSIS [1] и проведено их сравнение с экспериментальными данными.

Модель диэлектрической проницаемости верхнего слоя грунта Марса

Грунт Марса представляет собой смесь твердых пород, возможно, с примесью льда и газа [2]. Если предположить, что размеры неоднородностей в грунте много меньше длины зондирующей волны, то смесь отдельных компонент является однородной изотропной средой и характеризуется значением диэлектрической проницаемости смеси. Для расчетов воспользуемся формулой диэлектрической проницаемости смеси [3]:

$$\epsilon_s = \left(\sqrt{\epsilon_h} + v_i (\sqrt{\epsilon_i} - \sqrt{\epsilon_h}) \right)^2,$$

где ϵ_h - диэлектрическая проницаемость основного компонента, ϵ_i - диэлектрическая проницаемость включений, v_i - ее объемная часть ($v_i = V_i/V$, где V - объем смеси, V_i - объем включений). Если в состав смеси входит лед, то для диэлектрической проницаемости льда $\epsilon_l = \epsilon'_l + j\epsilon''_l$ используют формулы Дебая [4]:

$$\epsilon'_l = \frac{\epsilon_{st} + (f\tau)^2 \epsilon_\infty}{1 + (f\tau)^2}, \quad \epsilon''_l = \frac{(\epsilon_{st} - \epsilon_\infty) f\tau}{1 + (f\tau)^2}, \quad \text{где}$$

$\epsilon_{st} = \lim_{f \rightarrow 0} \epsilon'_l$, $\epsilon_\infty = \lim_{f \rightarrow \infty} \epsilon'_l$, f - частота зондирования.

Диэлектрические характеристики льдов подробно исследованы для температур до 100°К и согласуются с экспериментальными данными, если предположить, что $\epsilon_\infty = 3.15$, $\lg \tau = 2900/(T(z) - 15,3)$, $\epsilon_{st} = 133$ для частот от 0.1 до 10 МГц [4].

Измерения диэлектрической проницаемости ϵ и тангенса угла диэлектрических потерь $tg \delta$ метеорного вещества, образцов лунного грунта, земных гранитов и гнейсов проводились в двух диапазонах частот: 0,1-10 МГц и 133 МГц [5]. На основании этих данных для расчетов можно принять, что для твердой фазы $\epsilon = 7$, $tg \delta \approx 0,014$.

При подготовке эксперимента радиолокационного зондирования верхнего слоя грунта Марса для проекта

«Марс-96» в [6] были смоделированы профили диэлектрической проницаемости грунта Марса с учетом температурной зависимости верхнего слоя. Средняя

температура поверхности Марса ниже -60°C , поэтому грунт представляет собой смесь мерзлых пород [1]. В отличие от Земли, где мерзлые толщи пород имеют пространственное ограничение в обоих полушариях, на Марсе область многолетнего промерзания поверхностных пород распространяется от полюса до экватора. В результате сублимации ледовых компонент сформировался верхний слой сухих морозных пород. На полюсах планеты этот слой отсутствует – полярные районы покрыты ледовыми шапками. По аналогии с областями вечной мерзлоты Земли построена базисная модель глубинного строения приповерхностного грунта Марса [1], который представляет собой два лежащих на талой основе слоя: вымороженного (сухого) и морозного (с примесью льда). Толщины слоев зависят от широты. Для экваториальной зоны толщина верхнего слоя оценивается в 300-400 м, нижнего – 500-800м, для высоких широт – соответственно 40 – 100м и 600-2000м. В полярных областях морозный слой отсутствует, так как поверхность покрывает ледовый щит, толщина которого может достигать нескольких километров.

Исходя из возможности существования на Марсе засоленных льдов в [] предложены возможные составы рассолов, не замерзающих при температурах 223К, которые могут существовать на Марсе.

Глубинные профили диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь для модели грунта Марса представлены на рис.1.

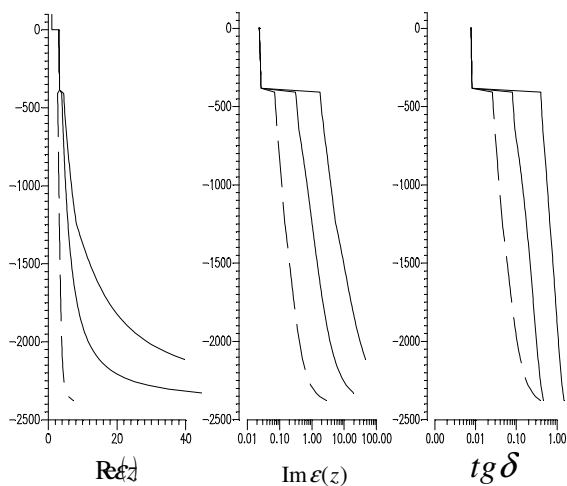


Рис.1. Глубинные профили диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь для модели грунта Марса: пористость у поверхности 20%, соленость 2%, толщина морозного слоя 400 м, 1-f=0.5МГц, 2-f=5МГц, пунктир – модель без соли.

Параметры модели, взятые для расчетов: пористость у поверхности 20%, соленость 2%, толщина морозного слоя 400м. Зависимость 1 построена для частоты 0,5МГц, 2 – для 5МГц,

пунктирная кривая соответствует модели без соли.

Диэлектрическая проницаемость ионосферы Марса

Для оценки диэлектрической проницаемости ϵ_u и проводимости σ_u ионосферы используются формулы [7]:

$$\epsilon_u = 1 - \frac{4\pi e^2 N_e(z)}{m(\omega^2 + \nu_{eff}^2)} \quad \text{и} \quad \sigma_u = \frac{e^2 N_e(z) \nu_{eff}}{m(\omega^2 + \nu_{eff}^2)},$$

где $\omega = 2\pi f$, $e = 4.80 \cdot 10^{-10}$, CGSE и $m = 9.11 \cdot 10^{-28}$, $N_e(z)$ – распределение электронов по высоте, $\nu_{eff} = \nu_e + \nu_m$ – эффективная частота соударения электронов с ионами и молекулами. Частота соударения электронов с молекулами – $\nu_m(z) = 8.3 \cdot 10^5 \pi a \sqrt{T(z) N_m(z)}$, где a – радиус основной молекулы газа. Будем полагать, что высотный профиль плотности молекул по высоте соответствует $N_m(z) = p(z)/(kT(z))$, где $p(z)$ – давление и $T(z)$ – температура. Эффективная частота соударений электронов с ионами определяется по формуле $\nu_i = 5.5 N_e(z) \ln(220 T_e / N_e^{1/3}(z)) / T_e^{3/2}$, где T_e – электронная температура. В первом приближении можно считать, что $N_i(z) \approx N_e(z)$ и ионосфера Марса совпадает с его термосферой, а оценки электронной температуры практически совпадают с температурой тяжелых частиц $T_i(z) \approx T_e(z) \approx T(z)$. В атмосфере Марса основной газ – CO_2 . Из данных спектроскопии параметр a оценивается как 7.6 \AA , из расчетов кинетической теории – 4.46 \AA [8].

Высотный профиль распределения электронной концентрации ионосферы Марса $N_e(z)$ зависит от зенитного угла Солнца. В таблице 1 приведены значения максимума электронной концентрации ионосферы Марса в зависимости от зенитного угла Солнца (данные «Марс-Экспресс» [9]).

Таблица 1
Параметры ионосферы Марса в зависимости от зенитного угла Солнца

α	83°	91°	96°	106°-120°
Максимум $N_e(z)$ [эл./см ⁻³]	83663	49505	31683	7921
Критическая частота [МГц]	2,6	2,0	1,6	0,8

Из таблицы 1 следует, что наиболее оптимальное время проведения экспериментов – ночь. На рис.2а приведен профиль электронной концентрации ионосферы Марса для зенитного угла Солнца примерно 116° - 120°

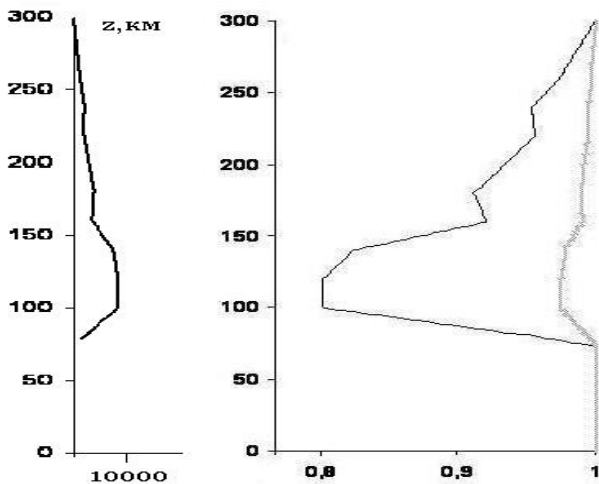
a) $N_e(z) \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$ b) ϵ_1

Рис.2а. Высотный профиль электронной концентрации ионосферы Марса для зенитного угла Солнца 120° .

Рис.2б. Высотный профиль действительной части диэлектрической проницаемости ионосферы Марса для частот зондирующего сигнала 1,8 МГц и 5 МГц при зенитном угле Солнца 120° .

На рис.2б приведен высотный профиль диэлектрической проницаемости ионосферы Марса для частот 1.8 и 5 МГц.

Результаты эксперимента и численное моделирование

Для расчета частотной зависимости коэффициента отражения от полупространства с произвольным профилем диэлектрической проницаемости использовался метод инвариантного погружения, который при расчете коэффициента отражения радиоволн позволяет оценить парциальные вклады в отражение и прохождение внутренних границ слоя [10].

В результате проведенных расчетов и анализа частотной зависимости коэффициента отражения определено, что наиболее существенный вклад в отраженный сигнал дают парциальные отражения от локализованных границ, таких как «атмосфера-грунт» и «лед - твердые породы».

На рис.3а показан энергетический спектр отраженного сигнала четвертого диапазона прибора «MARSIS» (центральная частота 5 МГц) космического аппарата «Марс-экспресс». Эксперимент выполнен на трассе 1855, измерения №785. Трасса 1855 пролегла над северной полярной шапкой Марса, где, как предполагают, слой льда лежит на слое грунта и наиболее гладкая поверхность. Частота максимумов на рис.3а определяет диэлектрическую толщину верхнего слоя грунта. При математическом описании спектр отраженного сигнала представим как произведение спектра излученного сигнала и частотной зависимости коэффициента отражения радиоволн от изучаемой среды $R(f)$. Именно комплексный коэффициент отражения несет исчерпывающую информацию о свойствах среды, с которой взаимодействует сигнал.

На рис.3б приведен смоделированный энергетический спектр сигнала, отраженного от грунта Марса.

В качестве излученного принят линейно-частотно-модулированный сигнал, аналогичный сигналу радиолокатора «MARSIS», который проводил измерения в четырех диапазонах с центральными частотами 1.8, 3, 4 и 5 МГц. На рис.3б приведен спектр для частоты 5 МГц, ширина излучаемого импульса 1 МГц, длительность 250 мкс [1]. Расчет приведен с учетом двойного прохождения через ионосферу, зенитный угол Солнца - 120° . При моделировании параметры слоя льда равны $D = 1000 \text{ м}$, $\text{Re} \epsilon_1 = 3,2$; $\text{Im} \epsilon_1 / \text{Re} \epsilon_2 = 5 \cdot 10^{-4}$. Слой лежит на подложке, диэлектрическая проницаемость которой - $\text{Re} \epsilon_1 = 7$; $\text{Im} \epsilon_1 / \text{Re} \epsilon_2 = 0,014$.

Как видно из результата моделирования отражения радиоволн от грунта с учетом ионосферы (рис.3б), полученный спектр адекватно описывает экспериментальные результаты (рис.3а) и используемые модели соответствуют реальным физическим данным:

- ✓ - волны с частотами значительно выше критической частоты ионосферы, отражаются от грунта,
- расстояние между максимумами в отраженном сигнале дают возможность оценить параметры верхнего слоя грунта.

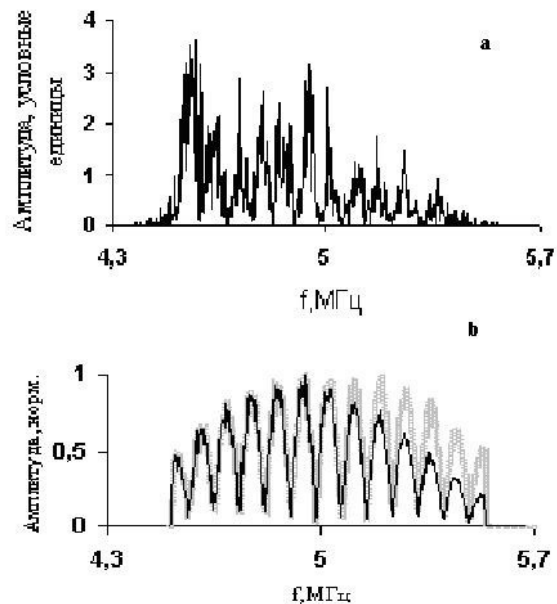


Рис.3а Энергетический спектр отраженного сигнала прибора «MARSIS», трасса 1855, измерение – 785.

Рис.3б Нормированный энергетический спектр отраженного сигнала (моделирование), светлая кривая без учета аппаратных искажений, темная – с учетом прохождения прямо-передающего тракта.

Выводы

Метод численного моделирования отражения радиоволн от грунта с произвольным глубинным распределением диэлектрической проницаемости в слое, предложенный в [10] позволил для эксперимента отражения радиоволн поверхностью Марса, выполненного радиолокатором «MARSIS», смоделировать отраженный сигнал с учетом имеющихся априорных данных о ионосфере Марса и диэлектрических характеристиках грунта и оценить толщину слоя льда, составляющую около 1000м в области полярной шапки Марса.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Picardi, G. Mars Express – MARSIS to Planetary Science Archive Interface Control Document/ G. Picardi, J. Plaut, R. Orosei, R. Huff, A. Ivanov // Technical report N 024.005.2003 – 2004 - p. 82.
- [2] Кузьмин Р.О. , Криолитосфера Марса. - М.: Наука.- 1983. – 144 с.
- [3] Ulaby, F. T. Microwave remote sensing: Active and Passive / F. T. Ulaby, R. K. Moore, A. K. Fung. - Artech House.- 1986. – p.997.
- [4] Финкельштейн, М. И. Радиолокация слоистых земных покровов / М. И. Финкельштейн, В. А. Мендельсон, В. А. Кутев. - М.: Советское Радио, 1977. - 174 с.
- [5] Ржевский, В.В. Исследование физических свойств грунта «Луны-20» и его земных аналогов / Ржевский В.В. [и др.] //Космические исследования. – 1976.- Т.XIV, Вып. 2. - С.187-292.
- [6] В. А. Андрианов, И. Н. Кибардина, Р. О. Кузьмин. Глубинные профили диэлектрической проницаемости криолитосферы Марса // *Астрономический вестник*. – 1993.- Т. 27, № 6.- С.3-11
- [7] Гинзбург, В. Л. Распространение электромагнитных волн в плазме / В. Л. Гинзбург. - М.: Наука.- 1967. - 684 с.
- [8] Таунс, Ч. Радиоспектроскопия / Ч. Таунс, А. Шавлов. - М: Изд. иностранной литературы.- 1959. - 327 с.
- [9] Gurnett, D. A. Radar soundings of the ionosphere of Mars/ D. A Gurnett and al// *Science*, 23 December, 2005, v 310, p.1929-1933
- [10] Андрианов В.А., О.В. Юшкова Математическая модель для расчета коэффициента отражения от диэлектрически неоднородного полупространства. *Радиотехника и электроника*.- 1994.- т.3, №4.- С.548-552.