

ПРОБЛЕМЫ ИНТЕРПРЕТАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ПОДПОВЕРХНОСТНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ В СВЧ ДИАПАЗОНЕ ПЛОСКО-ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ СРЕД

В.В.Загоскин, А.С. Шостак, С.П.Лукьянов, А.С.Карауш, О.В.Стукач, Р.В.Потемин

The influence of nonhomogeneous distribution of dielectric parameters in soils on shaping an electromagnetic response of sounding microwave signals has been investigated. The study revealed that for the correct interpretation it is necessary to take into account the profile distribution of $\epsilon, tg\delta$ soils.

В данной работе анализируется поведение коэффициента отражения плоской электромагнитной волны от почво-грунтов с неоднородным распределением диэлектрических параметров, обусловленных профильным распределением влажности, а также исследуется влияние таких сред на формирование электромагнитного отклика зондирующих СВЧ сигналов.

Радиоволновые характеристики почво-грунтов, такие как диэлектрическая проницаемость ϵ и тангенс угла диэлектрических потерь $tg\delta$ являются сложными функциями многих параметров, таких как: влажность, температура, тип и структура почво-грунтов, частоты взаимодействующего со средой поля, при этом на ϵ и $tg\delta$ почвенная влага (почвенный раствор) влияет наиболее сильно [1].

На графиках рис.1, рис.2 приведены значения $\epsilon, tg\delta$ почво-грунтов, соответствующие профильному распределению влажности с глубиной и без профильному распределению радиоволновых параметров. График 1 на рис.1 соответствует распределению ϵ' для дерново-подзолистой почвы после обильной грозы, график 2 соответствует этой же почве через два дня, а график 3 соответствует средним многолетним значениям влажности в июле. На рис. 2 приведены значения $tg\delta$ для этого же грунта; графики 1-3 здесь соответствуют графикам 1-3 на рис. 1 (графики 3 на рис. 1 и 2 соответствуют беспрофильному распределению).

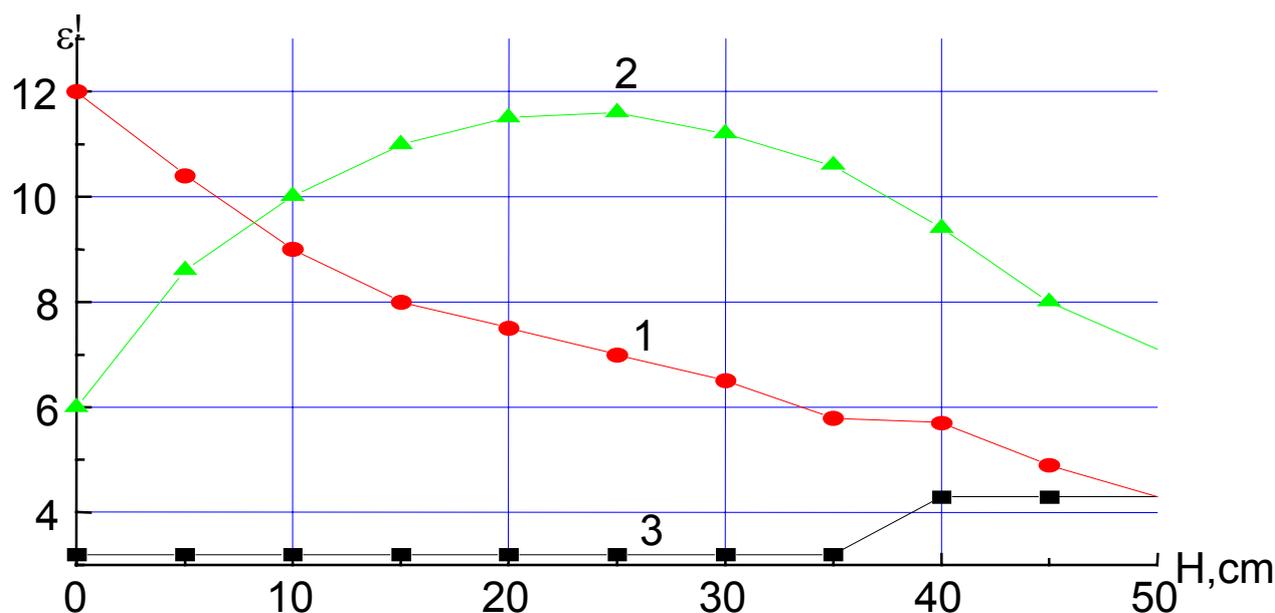


Рис.1

Среда с пространственным распределением диэлектрических параметров представляется в виде многослойной системы. Для наглядности примера система предполагается однородной в x и y направлениях, тогда $\epsilon = \epsilon'(1 + j \operatorname{tg} \delta)$, есть только функция координаты z ($\epsilon = \epsilon(z)$), причем на границах между слоями эта функция может быть разрывной. Внутри каждого слоя диэлектрическая проницаемость является функцией влажности и температуры, при этом эти функции зависят от координаты z , что означает зависимость ϵ от z внутри каждого слоя. Строго говоря, распределение влажности может быть не стационарным, поэтому диэлектрическая проницаемость будет функцией не только координат, но и времени. Однако, временные масштабы для тепло-влажностных процессов (часы и сутки) и процессов распространения сигналов существенно различны, поэтому временной зависимостью ϵ в данной задаче можно пренебречь.

Как правило, зависимость ϵ от координаты z внутри каждого слоя может быть задана численно в некоторых точках h_i . Для упрощения вычислений положим ϵ между точками h_i и h_{i+1} постоянной. Число таких разбиений внутри каждого слоя определяется видом функции $\epsilon(z)$; его можно сделать сколь угодно большим для достижения необходимой точности вычислений. При этом толщина слоя должна быть меньше $1/4$ длины волны с учетом диэлектрических параметров во всем диапазоне частот.

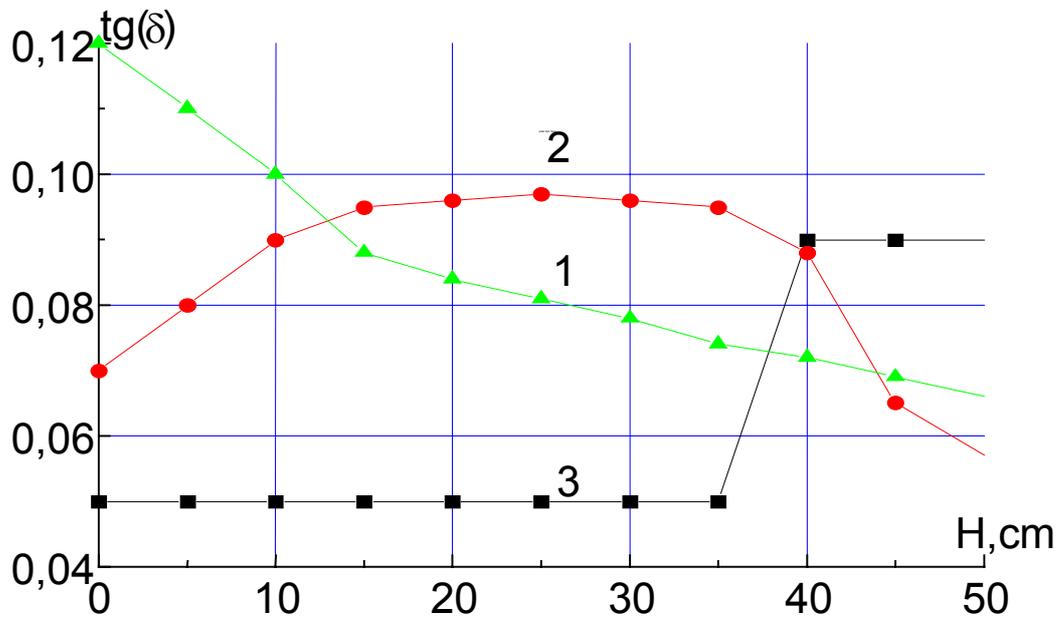


Рис.2

Задача формулируется следующим образом. На слоисто-неоднородное диэлектрическое полупространство, содержащее n – слоев (каждый единичный слой имеет свою толщину и диэлектрическую проницаемость) нормально падает плоская электромагнитная волна. Требуется определить коэффициент отражения (R) в свободном полупространстве в зависимости от длины волны (λ) при различных профильных распределениях радиоволновых параметров. Известно [2], что коэффициент отражения многослойной среды определяется по рекуррентной формуле :

$$R_{1,n} = (R_{1,2} + R_{2,n} \exp(-j*4* \pi * h_2 / \lambda * \sqrt{\epsilon_2})) / (1 + R_{1,2} * R_{2,n} * \exp(-j*4* \pi * h_2 / \lambda * \sqrt{\epsilon_2})), \quad (1)$$

где $R_{i,i} = 0$, $R_{i,i+1} = -(\sqrt{\epsilon_{i+1}} - \sqrt{\epsilon_i}) / (\sqrt{\epsilon_{i+1}} + \sqrt{\epsilon_i})$, $R_{i,k} = (R_{i,i+1} + R_{i+1,k} * \exp(-j*4* \pi * h_{i+1} / \lambda * \sqrt{\epsilon_{i+1}})) /$

$$/ (1 + R_{i,i+1} * R_{i+1,k} * \exp(-j*4* \pi * h_{i+1} / \lambda * \sqrt{\epsilon_{i+1}})), \quad k \neq i, \quad k \neq i+1. \quad (2)$$

Конечное выражение для коэффициента отражения R (в нашем случае 11 слоев со своими значениями ϵ и $tg \delta$) имеет следующий вид:

$$R = R_{1,12} = (R_{1,2} + R_{2,12} * \exp(-j*4* \pi * h_2 / \lambda * \sqrt{\epsilon_2})) / (1 + R_{1,2} * R_{2,12} * \exp(-j*4* \pi * h_2 / \lambda * \sqrt{\epsilon_2})), \quad (3)$$

Входящие в него значения для $R_{i,i+1}$ и $R_{i,k}$ легко получаются из (2) с учетом h_i и ϵ_i .

Результаты численного моделирования модуля коэффициента отражения в частотном диапазоне 0.3-0.7 ГГц приведены на графиках рис.3,4. Графики 1 и 2 рис.3 соответствуют профильным распределениям ϵ , $tg \delta$, приведенным на графиках 1 и 2 рис.1,2, а график 3 соответствует беспрофильному распределению диэлектрических параметров. На рис.4 приведены зависимости модуля коэффициента отражения для некоторых неоднородностей, помещенных на глубину 15 сантиметров: график 1 - металл, график 3- диэлектрический слой толщиной 10 сантиметров с диэлектрической проницаемостью 2.5, а для сравнения приведен график 2, соответствующий графику 2 на рис.3. В случае профильного распределения радиоволновых параметров, как на графике 2 рис. 1 и 2), отраженный сигнал практически отсутствует. На графике 3 рис.3 наблюдаются четко выраженные максимумы и минимумы модуля коэффициента отражения по положению которых на частотной оси можно определять толщину верхнего беспрофильного слоя, а по графику 1 рис.3 невозможно точно определить толщину верхнего слоя.

Таким образом, результаты приведенные в данной работе показывают, что учет профильных распределений диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь является необходимым условием корректной интерпретации данных подповерхностного зондирования объектов и почво-грунтов.

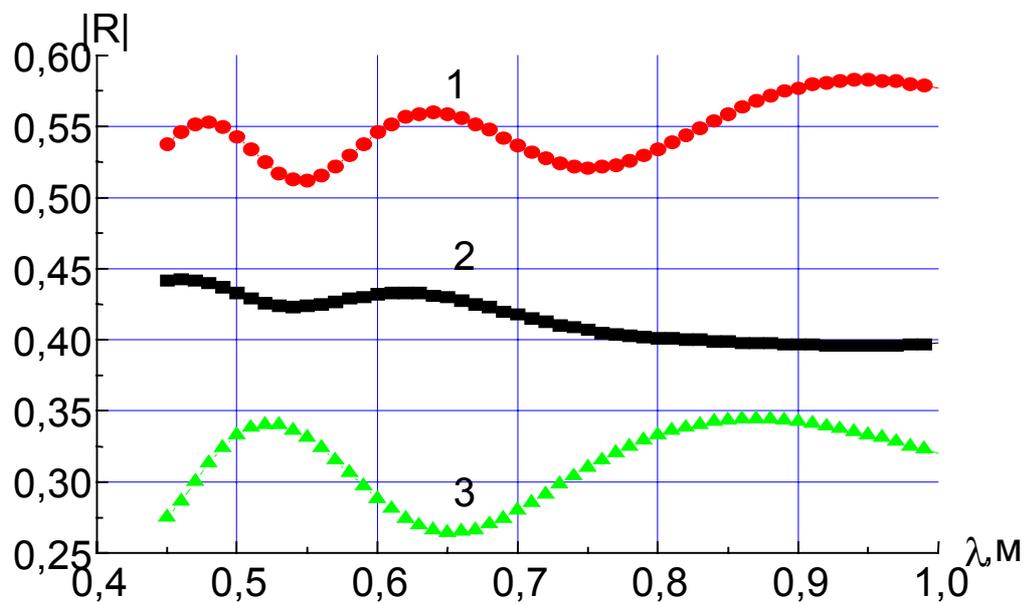


Рис.3

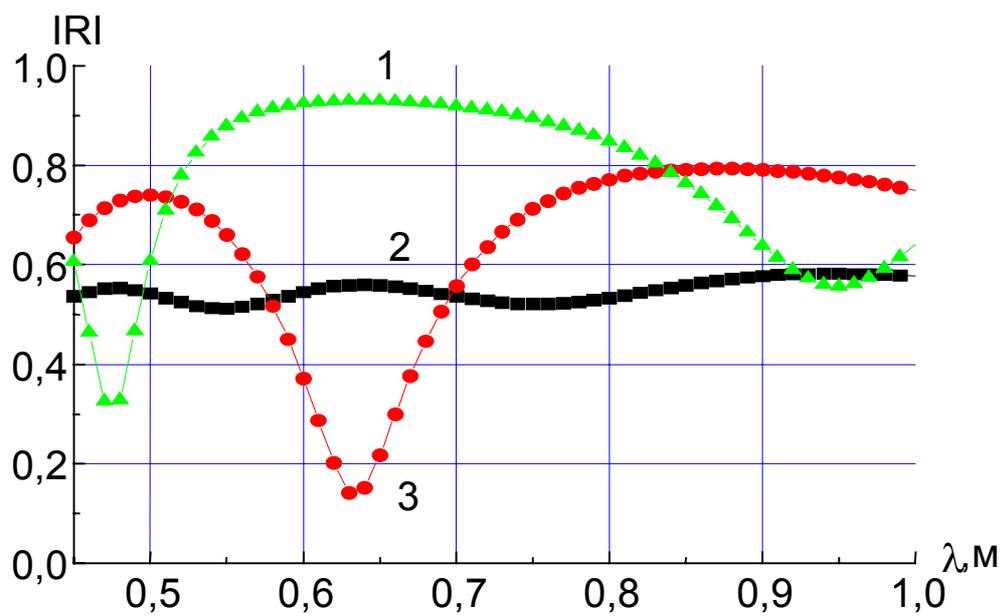


Рис.4

Литература

1. Шутко А.М. СВЧ – радиометрия водной поверхности и почвогрунтов. – М.: Наука, 1986. – 190с.
2. Радугин О.К. Теорема о связи решений задач о поле вертикального и горизонтального диполей // Изв. вузов Физика . - 1966. - N6. С. 86-90.