

О ВОЗМОЖНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ВЕРХНИХ СЛОЕВ ПОДСТИЛАЮЩИХ СРЕД ПО ИЗМЕРЕННЫМ КОЭФФИЦИЕНТАМ ОТРАЖЕНИЯ ПРИ НАКЛОННОМ ЗОНДИРОВАНИИ ПЛОСКИМИ ВОЛНАМИ ВЕРТИКАЛЬНОЙ И ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ В СВЧ ДИАПАЗОНЕ

Шостак А.С., Загоскин В.В., Лукьянов С.П., Карауш А.С. (Lukjanov.rff@elefot.tsu.ru)

Сибирский физико-технический институт г.Томск

В работе анализируются особенности поведения коэффициентов отражения плоских волн вертикальной и горизонтальной поляризации при наклонном падении на контролируемую среду. Исследуется возможность совместного использования результатов зондирования вертикально и горизонтально поляризованных волн для определения электрофизических свойств верхних слоев подстилающих сред. Предлагается один из возможных составов измерительной СВЧ установки, позволяющей по результатам измерения сигналов вертикальной и горизонтальной поляризаций определять диэлектрические параметры и толщины слоистых подстилающих сред.

NEW METHOD FOR CALCULATING OF DIELECTRIC PARAMETERS OF UPPER GROUND LAYERS WITH INFORMATION ABOUT REFLECTION COEFFICIENTS OF FLAT WAVES WITH VERTICAL AND HORIZONTAL POLARIZATIONS IN MICROWAVE RANGE

Shostak A.S., Zagockin V.V., Lukjanov S.P., Karaush A.S. (Lukjanov.rff@elefot.tsu.ru)

Siberian Physical and Technical Institute at Tomsk State University

This article illuminates and analyses the particularities of reflection coefficients of flat waves with vertical and horizontal polarizations when the waves are falling to the control ambience. The possibility of using the results of monitoring with vertically and horizontally polarized waves for the determination of electric and physical characteristics of upper ground layers are researched. Authors offer the one of the possible ways for technical realization of HF and millimeter wave devices for the electric and physical parameters supervision of monitoring layers.

Работа систем радиофизической диагностики и контроля подповерхностных сред, таких как: дорожные и аэродромные покрытия, оползневые структуры, почво-грунты и шахтные разрезы, основана на анализе реакции исследуемой среды на зондирующий сигнал.

При разработке методов интерпретации данных зондирования одной из наиболее актуальных является задача адекватного описания взаимодействия электромагнитных волн с зондируемой средой, характеризуемой комплексной диэлектрической проницаемостью ( $\epsilon^*$ ). Это связано с тем, что зондируемые материальные среды, а также строительные материалы, представляют собой сложные диэлектрические структуры. В реальных природных условиях эти среды постоянно контактируют с переменным температурным полем и водой в различных ее агрегатных состояниях. Эти переменные компоненты и определяют в основном диэлектрические свойства таких сред [1].

При решении задач радиоволновой диагностики состояния и свойств таких сред необходимо учитывать пространственное распределение  $\epsilon^*$ . Данные о профильном распределении  $\epsilon^*$  можно получить либо из априорных данных, либо используя приближенные теоретические модели [2,3,4], либо экспериментально. Одно из направлений совершенствования методов интерпретации отраженных

сигналов связано с решением модельных задач, учитывающих взаимодействие плоских волн со слоистой средой, которая описывается реальными геометрическими параметрами и реальными диэлектрическими характеристиками.

В данной работе анализируется поведение коэффициента отражения плоских волн вертикальной и горизонтальной поляризации при наклонном падении на контролируемую среду. Совместное использование результатов зондирования вертикально и горизонтально поляризованных волн позволяет извлекать информацию о диэлектрических свойствах зондируемых слоёв.

В настоящее время известны методы и аппаратура измерения диэлектрических параметров верхних слоев подповерхностных сред [1]. Предлагаемый метод определения толщин и диэлектрических параметров слоистых сред, таких как почво-грунты, строительных материалов и т.д. может расширить возможности уже известных методов.

**Постановка задачи.** На слоисто-неоднородную диэлектрическую среду из свободного пространства ( $\epsilon^* = 1, \mu^* = 1$ ) падает плоская электромагнитная волна под различными  $\Theta$  углами (Рис.1). Требуется определить значения коэффициента отражения ( $R_{отр.}$ ) от исследуемой среды в зависимости от угла падения волн горизонтальной и вертикальной поляризации в случае нахождения на поверхности среды диэлектрических слоёв. Верхний слой и подстилающая среда имеют полубесконечные толщины, а толщина второго сравнительно тонкого слоя переменная величина и соизмерима с длиной волны. Значения  $\epsilon^*$  второго слоя и подстилающей среды (третьего слоя) изменяются в ходе эксперимента.

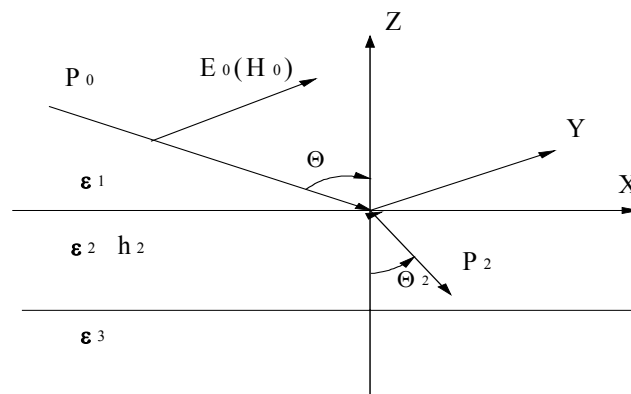


Рис.1. Геометрия задачи. Вертикальная— $E_0$  и горизонтальная— $H_0$  поляризации.

**Физическая модель.** Для проведения численного моделирования среда с профильным распределением  $\epsilon^*$  обычно представляется в виде многослойной системы [4]. В этом случае  $\epsilon^*$  будет функцией координаты  $Z$ , причём на границах между слоями эта функция может быть разрывной. Зависимость  $\epsilon^*(Z)$  внутри каждого слоя задается численными значениями в некоторых точках  $Z_i$ . Для упроще-

ния вычислений полагаем  $\epsilon^*$  между точками  $Z_i$  и  $Z_{i+1}$  постоянной и однородной в X и Y направлениях по слоям.

**Математическая модель.** Известно [5], что коэффициент отражения многослойной среды определяется по рекуррентной формуле:

$$R_{l,n} = \frac{R_{l,2} + R_{2,n} \exp(-j4\pi h_2 / \lambda \sqrt{\epsilon_2})}{1 + R_{l,2} R_{2,n} \exp(-j4\pi h_2 / \lambda \sqrt{\epsilon_2})}, \quad (1)$$

$$\text{где } R_{i,i} = 0, \quad R_{i,i+1} = \frac{\sqrt{\epsilon_{i+1}} - \sqrt{\epsilon_i}}{\sqrt{\epsilon_{i+1}} + \sqrt{\epsilon_i}}, \quad (2)$$

$$R_{i,k} = \frac{R_{i,i+1} + R_{i+1,k} \exp(-j4\pi h_{i+1} / \lambda \sqrt{\epsilon_{i+1}})}{1 + R_{i,i+1} R_{i+1,k} \exp(-j4\pi h_{i+1} / \lambda \sqrt{\epsilon_{i+1}})},$$

$$\text{где } k \neq i, \quad k \neq i + 1. \quad (3)$$

Используя формулы (1-3), найдем формулы для коэффициента отражения  $R_{1,3}$  в случае принятой нами модели исследования:

$$R_{1,3} = \frac{R_{1,2} + R_{2,3} \exp(\gamma_1)}{1 + R_{1,2} R_{2,3} \exp(\gamma_1)}, \quad \text{где } \gamma_1 = -j \frac{4\pi h_2}{\lambda \sqrt{\epsilon_2}}, \quad (4)$$

тогда для горизонтальной поляризации [6]:

$$R_{1,2} = \frac{\sqrt{\epsilon_1} \cos \Theta - \sqrt{\epsilon_2 - \epsilon_1 (\sin \Theta)^2}}{\sqrt{\epsilon_1} \cos \Theta + \sqrt{\epsilon_2 - \epsilon_1 (\sin \Theta)^2}}, \quad (5)$$

$$R_{2,3} = \frac{\sqrt{\epsilon_2} \cos \Theta_2 - \sqrt{\epsilon_3 - \epsilon_2 (\sin \Theta_2)^2}}{\sqrt{\epsilon_2} \cos \Theta_2 + \sqrt{\epsilon_3 - \epsilon_2 (\sin \Theta_2)^2}}, \quad \text{где } \Theta_2 = \arcsin\left(\frac{\sin \Theta}{\sqrt{\epsilon_2}}\right),$$

а для вертикальной поляризации [6]:

$$R_{1,2} = \frac{\epsilon_2 \cos \Theta - \sqrt{\epsilon_1 (\epsilon_2 - \epsilon_1 (\sin \Theta)^2)}}{\epsilon_2 \cos \Theta + \sqrt{\epsilon_1 (\epsilon_2 - \epsilon_1 (\sin \Theta)^2)}},$$

$$R_{2,3} = \frac{\epsilon_3 \cos \Theta_2 - \sqrt{\epsilon_2 (\epsilon_3 - \epsilon_2 (\sin \Theta_2)^2)}}{\epsilon_3 \cos \Theta_2 + \sqrt{\epsilon_2 (\epsilon_3 - \epsilon_2 (\sin \Theta_2)^2)}}. \quad (6)$$

По формулам (4–6) для разных состояний среды были рассчитаны модули коэффициентов отражения для волн горизонтальной  $|R_{\text{г}}|$  и вертикальной  $|R_{\text{в}}|$  поляризации при различных углах падения  $\Theta$  на зондируемую среду (Рис.1). При этом

варьировалась толщина тонкого слоя  $h_2$ , задавались различные значения  $\epsilon^*$  тонкого слоя и подстилающей среды. Для наглядности толщина тонкого слоя задавалась в относительных единицах и нормировалась при этом к длине волны в среде

$$\gamma_1 = -j \frac{4\pi h_2}{\lambda \sqrt{\epsilon_2}} = -j \frac{4\pi H}{\epsilon_2}, \quad \text{где} \quad H = \frac{h_2}{\lambda_{cp}}, \quad \lambda_{cp} = \frac{\lambda}{\sqrt{\epsilon_2}}.$$

По результатам численных расчётов были построены графики модулей коэффициентов отражения для волн горизонтальной  $|R_r|$  и вертикальной  $|R_v|$  поляризации (Рис.2-5) в зависимости от изменения угла падения волны в пределах от 0 до 90 градусов, задания относительной толщины тонкого слоя  $H$  от 0 до 0,5 и варьирования значений  $\epsilon^*$  тонкого слоя и подстилающей среды.

Анализ формул (4-6) и графиков на Рис.2-5 показывает, что коэффициенты отражения  $|R_v|$  и  $|R_r|$  на Рис.2,3 ведут себя классически, как в случае падения плоской волны на однородную диэлектрическую среду. Графики  $|R_r|$  монотонно растут от минимального значения при  $\Theta = 0$  до максимального - при  $\Theta = 90$ . Зависимость  $|R_v|$  от угла падения имеет более сложный вид. Вначале координат графики монотонно убывают до нуля, а затем более резко возрастают до единицы. Положение минимума на графике зависит от толщины и  $\epsilon^*$  тонкого слоя, а также  $\epsilon^*$  подстилающей среды (Рис.2,3). Кроме этого, наблюдается совпадение графиков  $|R_v|$  и  $|R_r|$ , полученных в случае отсутствия тонкого слоя, с графиками, когда толщина тонкого слоя равна  $0,5\lambda_\epsilon$  (Рис.2-5). Этот факт объясняется тем, что отраженные волны от тонкого слоя и среды суммируются в фазе.

В определенных ситуациях поведение графиков  $|R_v|$  и  $|R_r|$  отличается от рассмотренного выше (Рис.4,5). При определенных значениях  $\epsilon_1$ ,  $\epsilon_2$ ,  $\epsilon_3$  слоёв и толщине тонкого слоя равной  $0,25\lambda_\epsilon$  отраженные волны от верхнего слоя и подстилающей поверхности суммируются в противофазе, что и приводит к изменению вида графиков  $|R_v|$  и  $|R_r|$ . График  $|R_r|$  (Рис.4(3)) ведет себя как графики  $|R_v|$  на Рис.2,3, при этом наблюдается провал до нуля, если имеют место слои без потерь, и отличен от нуля для сред с потерями. График  $|R_v|$  на Рис.4,5 повторяет ход графиков  $|R_r|$  на Рис.2,3. Величина коэффициентов  $|R_v|$  и  $|R_r|$  при нормальном падении волны на поверхность определяется соотношением  $\epsilon_1$ ,  $\epsilon_2$ ,  $\epsilon_3$  слоёв, при этом равенство нулю  $|R_v|$  и  $|R_r|$  при  $\Theta = 0$  наблюдается, когда выполняется условие  $\epsilon_2 = \sqrt{\epsilon_1 \epsilon_3}$  (Рис.5 (3,6)).

Для наглядности поведения коэффициентов отражения  $|R_v|$  и  $|R_r|$  от угла падения  $\Theta$  и толщины тонкого слоя  $H$  построены трехмерные графики Рис.6-11. Анализ рисунков подтверждает наличие характерных провалов на графиках  $|R_v|$  и  $|R_r|$ , которые появляются при определенных соотношениях  $\epsilon_1$ ,  $\epsilon_2$ ,  $\epsilon_3$  слоёв, угла падения  $\Theta$  и толщины тонкого слоя  $H$ . Глубина провалов на графиках зависит от наличия потерь в среде и тонком слое. Факт наличия особых точек в поведении коэффициентов отражения  $|R_v|$  и  $|R_r|$  можно использовать для разработки алгоритмов определения  $\epsilon^*$  или толщины тонкого слоя.

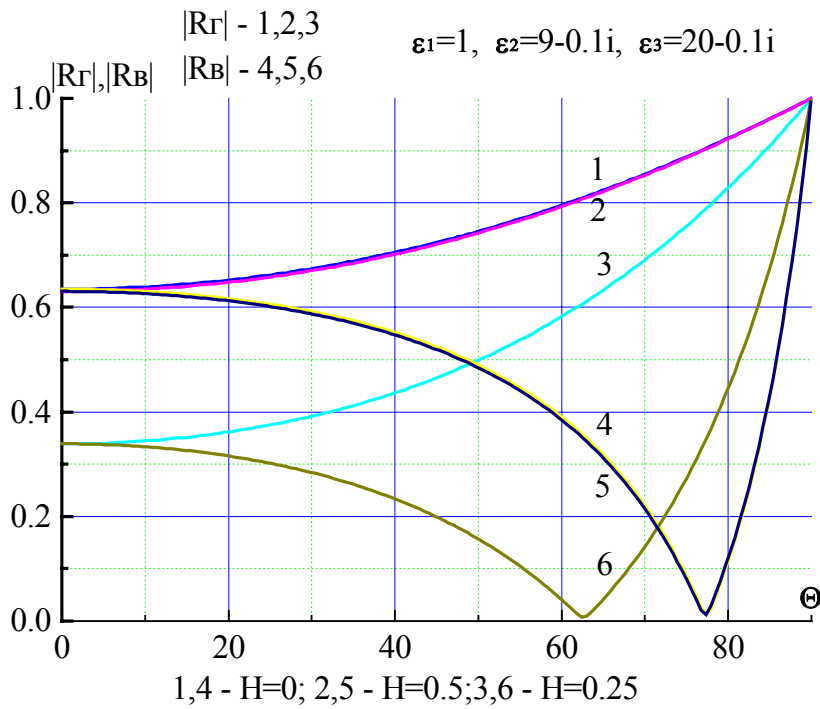


Рис 2. Зависимость модуля коэффициента отражения горизонтальной поляризации -  $|R_{\Gamma}|$  и вертикальной поляризации -  $|R_{\text{В}}|$  от угла падения при различных толщинах слоя  $-H$ .

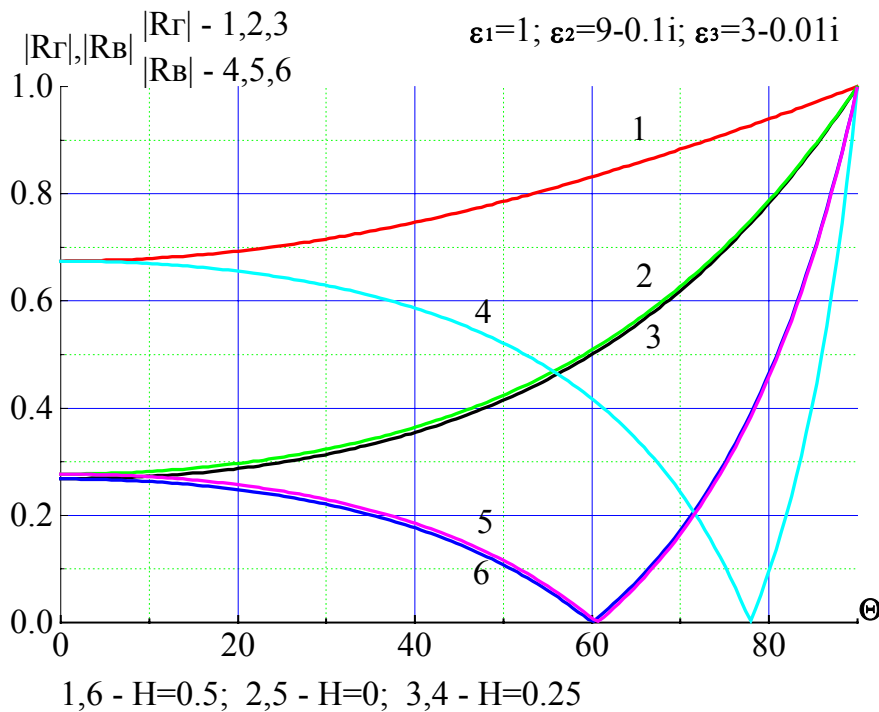


Рис 3. Зависимость модуля коэффициента отражения горизонтальной поляризации -  $|R_{\Gamma}|$  и вертикальной поляризации -  $|R_{\text{В}}|$  от угла падения при различных толщинах тонкого слоя  $-H$ .

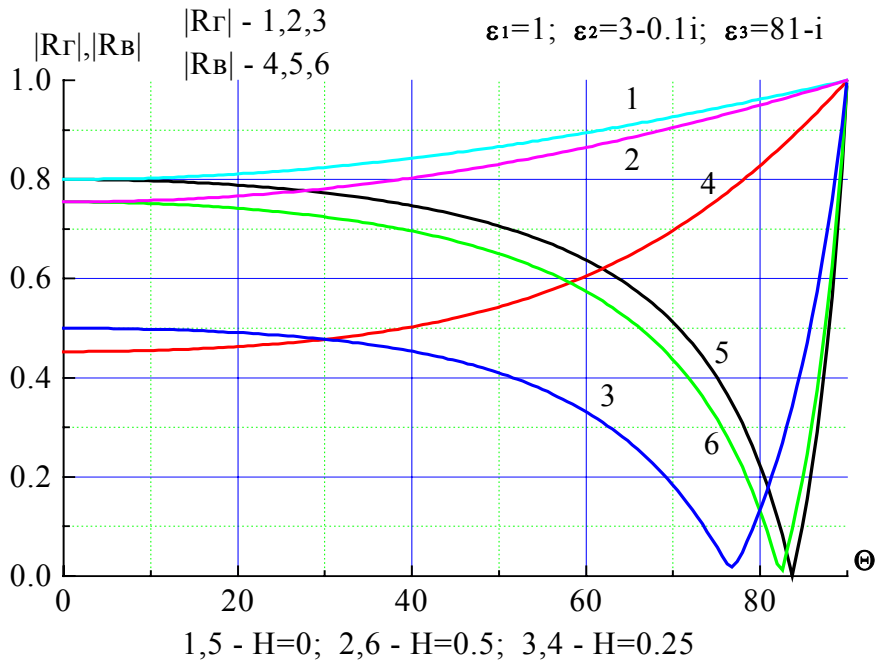


Рис 4. Зависимость модуля коэффициента отражения горизонтальной поляризации -  $|R_{\Gamma}|$  и вертикальной поляризации -  $|R_{В}|$  от угла падения при различных толщинах тонкого слоя  $-H$ .

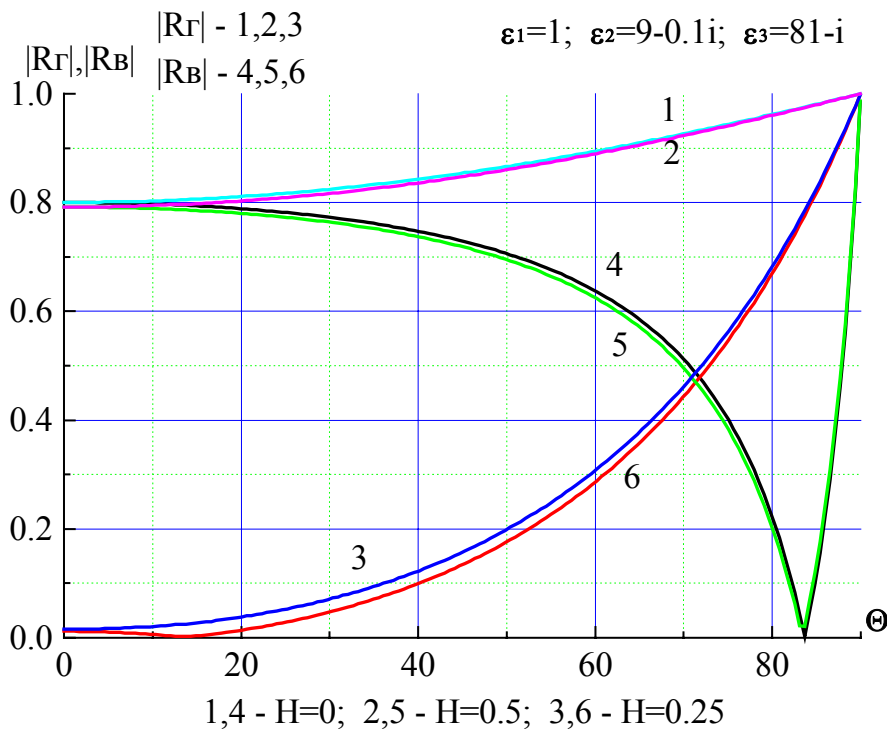
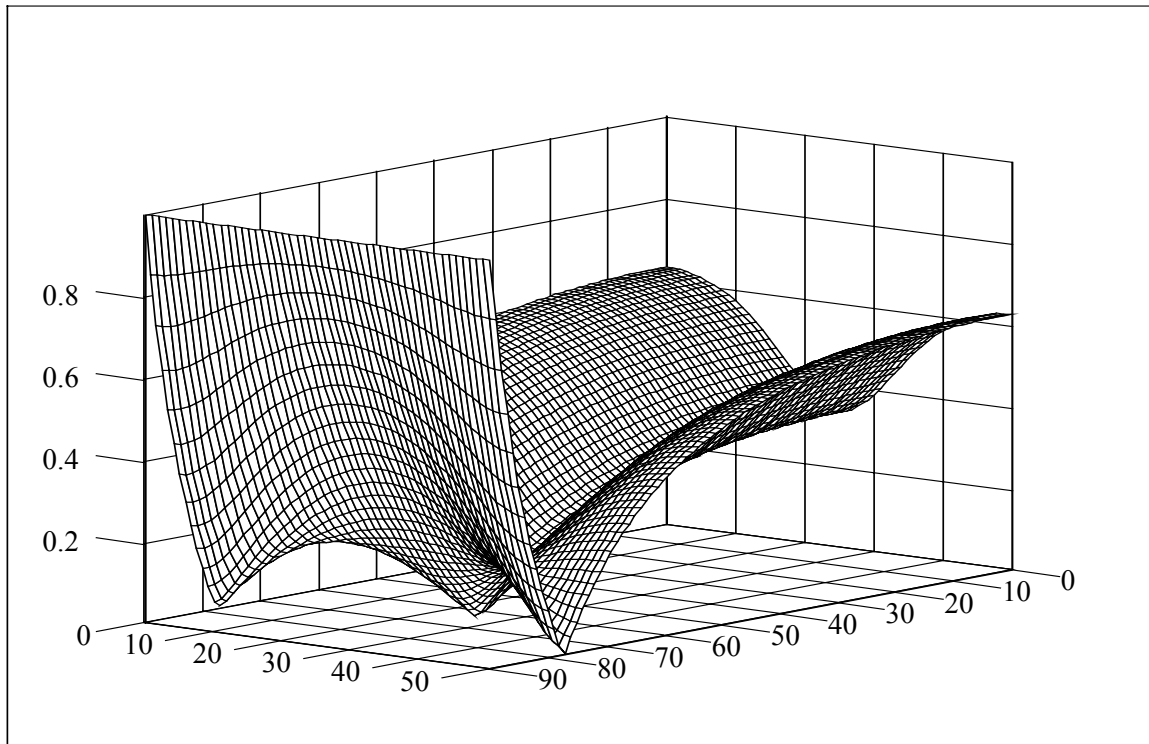
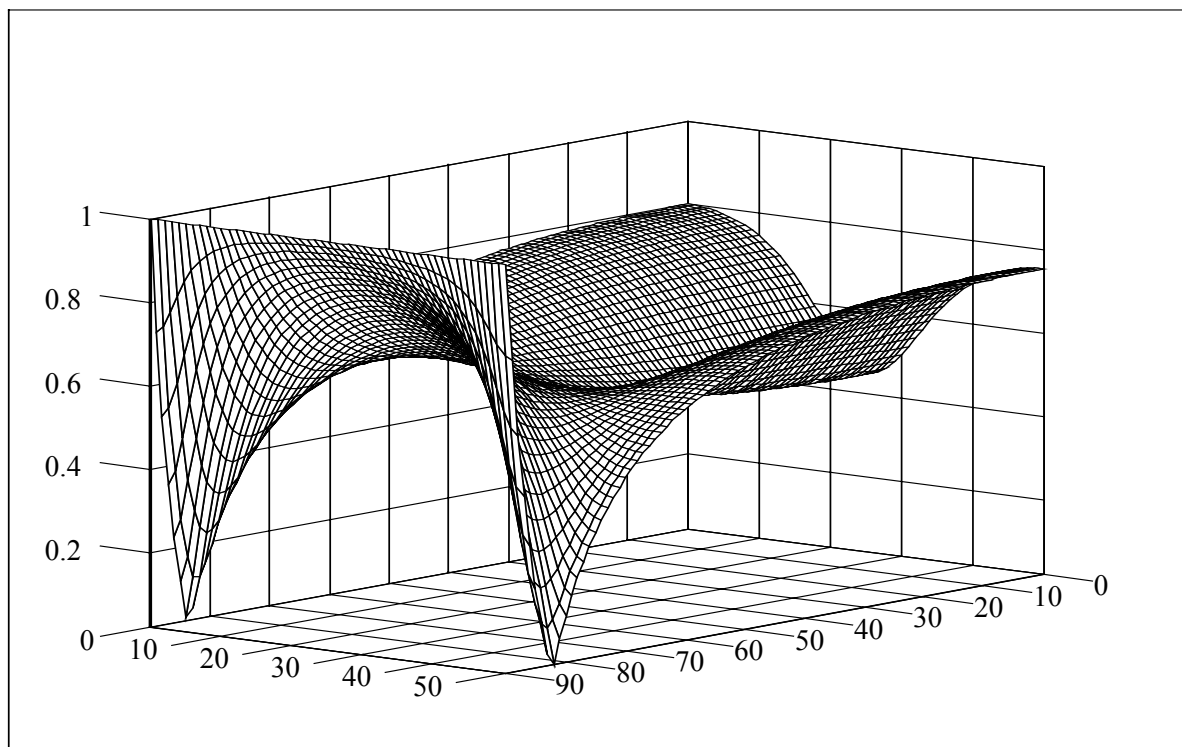


Рис 5. Зависимость модуля коэффициента отражения горизонтальной поляризации -  $|R_{\Gamma}|$  и вертикальной поляризации -  $|R_{В}|$  от угла падения при различных толщинах тонкого слоя  $-H$ .



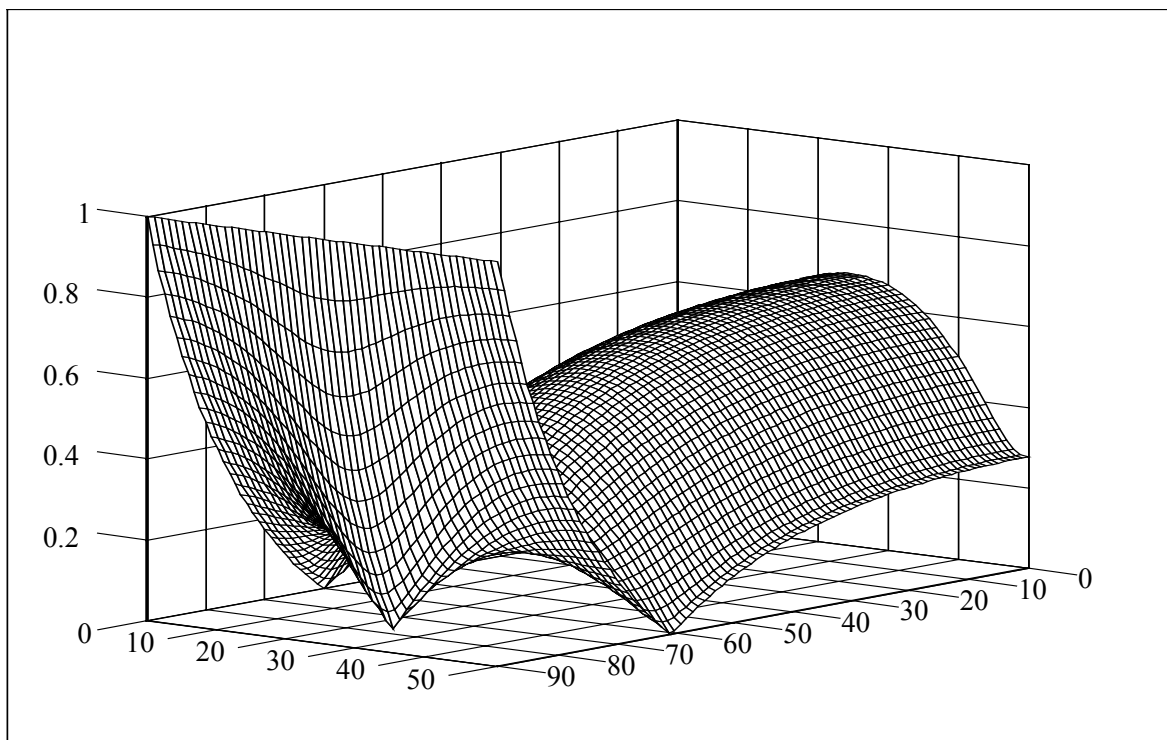
М

Рис.6 Зависимость  $|R_v|$  от угла падения  $\Theta$  ( $0..90^\circ$ ) и толщины слоя  $H/100$ ; Изменяется  $|R_v|$  в пределах от 0 до 1  $\epsilon_1=1$ ;  $\epsilon_2=9-j0.1$ ;  $\epsilon_3=20-j0.1$ .



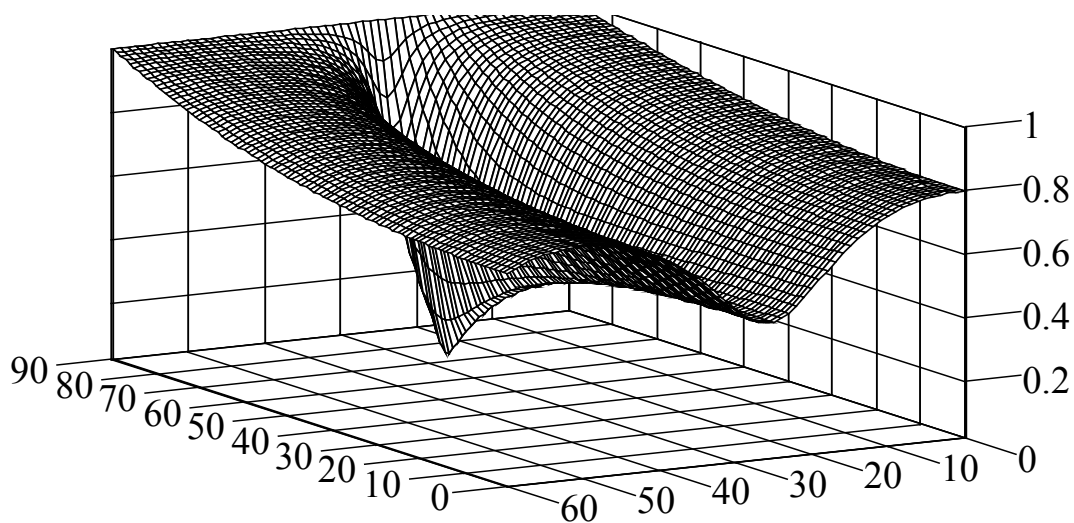
М

Рис.7. Зависимость  $|R_v|$  от угла падения  $\Theta$  ( $0..90^\circ$ ) и толщины слоя  $H/100$ ; Изменяется  $|R_v|$  в пределах от 0 до 1  $\epsilon_1=1$ ;  $\epsilon_2=3-j0.1$ ;  $\epsilon_3=81-j1$ .



М

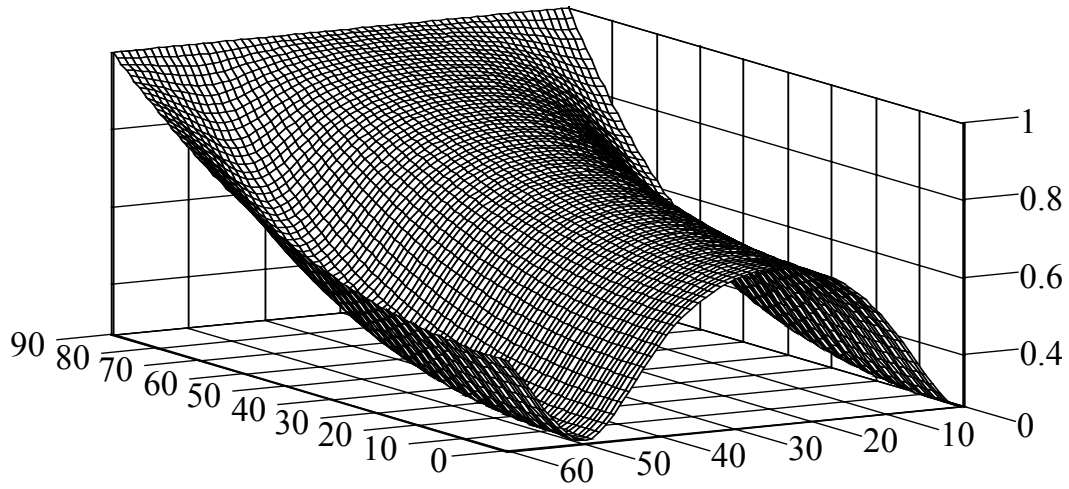
Рис.8. Зависимость  $|R_v|$  от угла падения  $\Theta$  ( $0..90^\circ$ ) и толщины слоя  $H/100$  ( $0..50$ );  
Изменяется  $|R_v|$  в пределах от 0 до 1.  $\varepsilon^*_1=1$ ;  $\varepsilon^*_2=9-j0.1$ ;  $\varepsilon^*_3=3-j0.01$ .



М

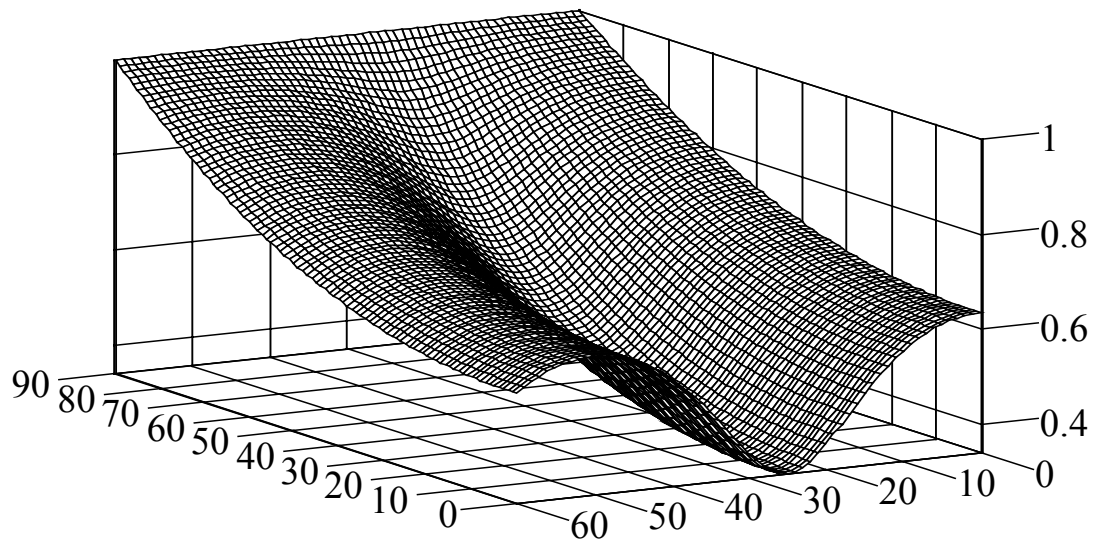
Рис.9. Зависимость  $|R_r|$  от угла падения  $\Theta$  ( $0..90^\circ$ ) и толщины слоя  $H/100$  ( $0..50$ );  
Изменяется  $|R_r|$  от 0 до 1.  $\varepsilon^*_1=1$ ;  $\varepsilon^*_2=3-j0.1$ ;  $\varepsilon^*_3=81-j0.1$ .





М

Рис.10. Зависимость  $|R\Gamma|$  от угла падения  $\Theta$  ( $0..90^0$ ) и толщины слоя  $H/100$  ( $0..50$ );  
Изменяется  $|R\Gamma|$  от 0 до 1.  $\varepsilon^*_1=1$ ;  $\varepsilon^*_2=9-j0.1$ ;  $\varepsilon^*_3=3-j0.01$ .



М

Рис 11. Зависимость  $|R\Gamma|$  от угла падения  $\Theta$  ( $0..90^0$ ) и толщины слоя  $H/100$  ( $0..50$ ).  
Изменяется  $|R\Gamma|$  от 0 до 50.  $\varepsilon^*_1=1$ ;  $\varepsilon^*_2=9-j0.1$ ;  $\varepsilon^*_3=20-j0.1$ .

По (4-6) были найдены координаты минимумов коэффициентов отражения  $|R_v|$  (Рис.12) и  $|R_\Gamma|$  (Рис.13) для фиксированных значений  $\epsilon_2$  тонкого слоя в зависимости от  $\epsilon_3$  среды и угла падения волны  $\Theta$ . Совпадающие графики 1,2 на Рис.12 показывают зависимость минимума  $|R_v|$  от  $\epsilon_3$  и угла падения волны  $\Theta$  для случая:  $\epsilon_2 = 9-j0,01$ ;  $\mathbf{H}=0$ ; и  $\mathbf{H}=0,5$ . График 1 построен по формулам (4,6), а график 2 по найденной эмпирической формуле

$$\Theta_{Br,\epsilon} = \arctan\left(\frac{\sqrt{|\epsilon_1|}}{\sqrt{|\epsilon_3|}}\right). \quad (7)$$

Совпадающие графики 3,4 на Рис.12 показывают зависимость минимума  $|R_v|$  от  $\epsilon_3$  и угла падения волны  $\Theta$  для случая:  $\epsilon_2 = 9-j0,01$ ;  $\mathbf{H}=0,25$ . График 3 построен по формулам (4,6), а график 4 по найденной эмпирической формуле

$$\Theta_\tau = \arccos\left(\frac{\sqrt{|\epsilon_1||\epsilon_3|}}{|\epsilon_2|}\right). \quad (8)$$

Анализ Рис.12 показывает, что пересечение графиков 1,2 наблюдается при выполнении условия  $\epsilon_2 = \epsilon_3$  –это случай однослойной среды

График на Рис.13 построен по формулам (4,5). и показывают зависимость минимума  $|R_\Gamma|$  от  $\epsilon_3$  и угла падения волны  $\Theta$  для случая:  $\epsilon_2 = 3-j0,01$ ;  $\mathbf{H}=0,25$ . Значение  $|R_\Gamma|$  при  $\Theta=0$  определяется соотношением  $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ , при этом минимальное значение достигается при выполнении следующего условия (Рис.5)

$$\epsilon_2 = \sqrt{\epsilon_3 \epsilon_1}.$$

Дальнейшее увеличение  $\epsilon_3$  ( $\epsilon_2 = \text{const}$ ) приводит к смещению провала на графике в сторону больших углов падения (Рис.4): так при  $\epsilon_2 = 3$  и  $\epsilon_3 = 81$  (вода)  $\Theta$  равен 84, а когда  $\epsilon_3$  принимает значения металла, то  $\Theta$  равен 87,3 (Рис.13).

Рассчитанные данные зависимостей  $|R_\Gamma|$  от  $\epsilon_3$  для случаев  $\mathbf{H}=0,5$  и  $\mathbf{H}=0,25$  по (4,5) при  $\epsilon_2 = 3-j0,01$  приведены в таблице.

Таблица

Значения  $|R_\Gamma|$  в зависимости от  $\epsilon_3$  для случаев  $\mathbf{H}=0,5$  и  $\mathbf{H}=0,25$  при  $\epsilon_2 = 3-j0,01$ .

$\epsilon_3$		80	60	50	40	30	20	10	8	6	4	3	2	1
$ R_\Gamma $	$,25\lambda$	,5	0,44	0,4	,35	,28	0,2	,04	,045	0,1	0,2	,27	,36	,48
$ R_\Gamma $	$0,5\lambda$	,8	0,76	,74	,72	,69	,64	,53	,47	,43	,35	,29	,23	,22

**Выводы.** Результаты проведенных модельных расчетов позволяют сделать вывод о возможности контроля параметров слоистых сред с помощью электромагнитных волн вертикальной и горизонтальной поляризации в СВЧ диапазоне. Методика нахождения параметров среды предполагает измерение коэффициентов  $|R_v|$  и  $|R_\Gamma|$  путём сканирования частоты генератора при различных углах падения

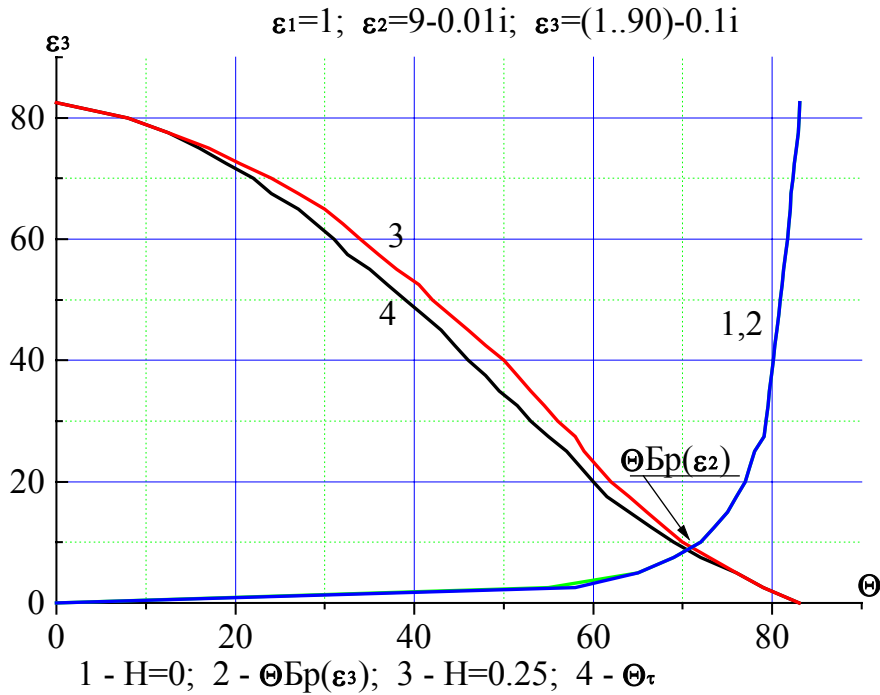


Рис.12 Положение провалов в графиках  $|R_v|$  на оси  $\Theta$  (Рис.2-5) в зависимости от  $\epsilon_3$  среды для различных толщин тонкого слоя –  $H$ .

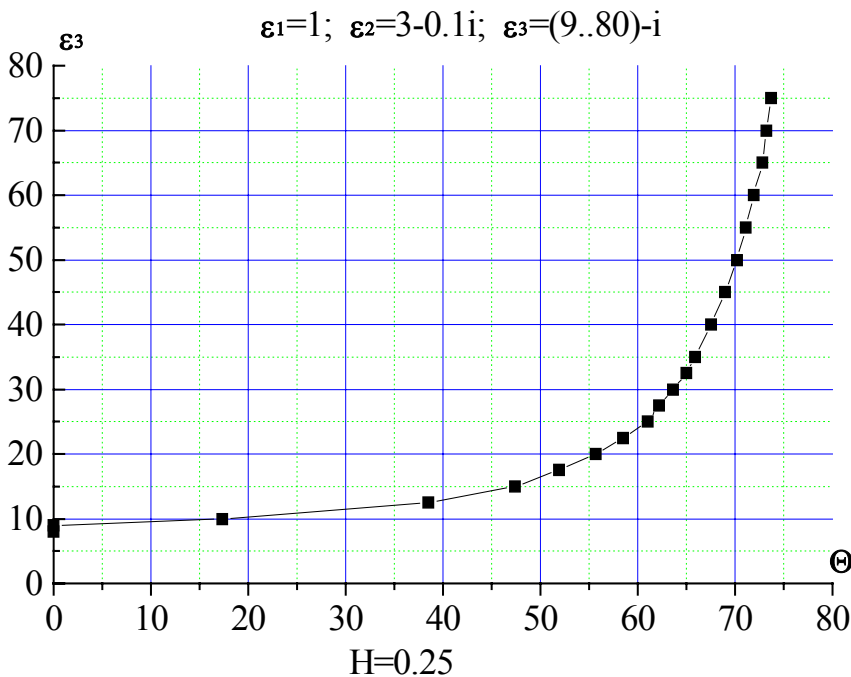


Рис 13. Положение провалов в графиках  $|R_\Gamma|$  на оси  $\Theta$  (Рис.2-5) в зависимости от  $\epsilon_3$  среды при  $H=0,25$ . Для случая металла под слоем наблюдается провал  $|R_\Gamma|$  при угле падения волны 87 градусов.

волны на поверхность. Затем по графикам находятся особые точки и определяются их координаты - значения коэффициентов отражения  $|R_v|$ ,  $|R_g|$  и углы падения волн. При этом коэффициенты отражения  $|R_v|$ ,  $|R_g|$  равны нулю, когда имеет место среда без потерь, и отличны от нуля - в случае среды с потерями. Используя измеренные параметры и априорно известные находят по формулам (4-6) или (7,8) неизвестные параметры. В качестве контролируемых параметров могут выступать диэлектрические проницаемости слоёв и среды, либо толщина тонкого слоя.

**Заключение.** Для определения границ практического использования результатов модельных исследований авторы продолжают работу в следующих направлениях. Предполагается создать измерительную установку, состоящую из генератора с перестраиваемой частотой, излучающей и приемной антенны, измерительного приёмника и поворотно-подъемного устройства для задания необходимых углов падения волны на поверхность среды. Будут разработаны методики определения диэлектрических параметров и толщин по результатам измерений сигналов вертикальной и горизонтальной поляризаций.

### Литература

1. Шутко А.М. СВЧ - радиометрия водной поверхности и почвогрунтов. - М.: Наука, 1986. 190 с.
2. Загоскин В.В., Катаев С.Г., Тюльков Г.И., Чернышов В.Н. Исследование динамики пространственного распределения влажности, температуры и диэлектрических характеристик в капиллярно-пористых средах.- Изв. вузов. Физика, 1994. N11. - С. 10.
3. Загоскин В.В., Катаев С.Г., Тюльков Г.И., Чернышов В.Н. Влияние тепловлажностных факторов на пространственное распределение диэлектрических характеристик в капиллярно-пористых средах с проводящим компонентом на сверхвысоких частотах. - Изв. вузов. Физика, 1996, N10. - С.50.
4. Загоскин В.В., Шостак А.С., Лукьянов С.П. Влияние профильных распределений диэлектрических характеристик почво-грунтов и тонких слоёв сред на коэффициент отражения при зондировании плоскими горизонтально поляризованными волнами в СВЧ диапазоне. - Электронный журнал "Радиоэлектроники", 1999, N8.
5. Козулин Ю.Н. Изв. АН СССР, сер.геофиз., 1960, стр. 1204.
6. Бреховский Л.М. Волны в слоистых средах. -М.: Изд. АН СССР, 1956.

г. Томск 20.10.1999г