

## Метод встречных волн в моделировании радиотеплокационных сигналов, отраженных земной поверхностью

Ю.Л. Ломухин, В.П. Бутуханов, Е.Б. Атутов

Институт физического материаловедения СО РАН  
Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6 Email: lom@ipms.bsnet.ru

*Даны аналитические выражения коэффициентов обратного отражения и радиояркостной температуры. Показана их связь. Приведены теоретические и экспериментальные угловые зависимости обратного отражения и радиояркостной температуры реальной почвы и водной среды, обнаружено хорошее согласие.*

*Analytical expressions of backscatter coefficient and brightness temperature are given. Their relationship is shown. There is good agreement between theoretical and experimental angular dependence of backscatter and brightness temperature real soil and water environments.*

Проблема моделирования радиотеплокационных сигналов, переизлученных и излученных земной средой в настоящее время остается актуальной [1-6]. Проблема в данном случае связана не только со сложностью и многофакторностью рассеяния волн, но и выбором адекватного физического механизма отражения, учитываемого в теоретических моделях. В работе [7] указано, что построение модели отражения, с учетом постулируемой тройкой волн: падающей, отраженной и преломленной недостаточно для описания сложного явления отражения и преломления. В частности, традиционный подход не объясняет появления волн с отрицательным углом преломления и недостаточно полно описывает обратное радиолокационное отражение, даже при модификации его волновыми методами, например, методом малых возмущений [8] и т.д.

В данном сообщении приведены аналитические выражения коэффициентов обратного отражения и радиояркостной температуры, полученные из электродинамической модели отражения и преломления волн, построенной на основе многомодового механизма [9]. Этот механизм без всякого постулирования включает как традиционные составляющие (падающая, отраженная и преломленная), так и встречные им волны, вынужденно возбужденные и распространяющиеся строго назад по тем же траекториям, что и исходные. Этот механизм во многом аналогичен механизму, при котором имеет место обращение волнового фронта [10].

Пусть имеем две среды, разделенные границей, одна почти радиопрозрачная с  $\varepsilon_1 = \varepsilon'_1 - i\varepsilon''_1$ ,  $\mu_1 = \mu_0$ ,  $\varepsilon''_1 \ll \varepsilon'_1$ , вторая с  $\varepsilon_2 = \varepsilon'_2 - i\varepsilon''_2$ ,  $\mu_2 = \mu_0$ . В первой среде расположен радар или радиометр с антенной, имеющие узкую диаграмму направленности

$F(\varphi_1) = Ge^{-\left(\frac{\varphi_1}{\beta}\right)^2}$ ,  $G$  – коэффициент усиления антенны,  $\beta$  – ширина диаграммы направленности антенны,  $\varphi_1$  – угол облучения поверхности раздела.

Если вектор поля  $\mathbf{E}$  лежит в плоскости падения, то коэффициенты обратного отражения есть

$$\sigma_{VV}^{\parallel}(\varphi_1) = B^{\parallel}(\varphi_1)B^{\parallel}(\varphi_1)^* \cos^2 \varphi_1, \quad \sigma_{VH}^{\parallel}(\varphi_1) = B^{\parallel}(\varphi_1)B^{\parallel}(\varphi_1)^* \cos \varphi_1 \sin \varphi_1, \quad (1)$$

$$B^{\parallel}(\varphi_1) = T_{12}^{\parallel}(\varphi_1)T_{21}^{\parallel}(\varphi_1)e^{-2ik_2h_2} \left[ 1 + GF(\varphi_1) \frac{V_{12}^{\parallel}(0)[1 - T_{12}^{\parallel}(0)T_{21}^{\parallel}(0)e^{-4ik_2h_2}]}{T_{12}^{\parallel}(0)T_{21}^{\parallel}(0)e^{-2ik_2h_2}} \right].$$

Если вектор  $\mathbf{E}$  перпендикулярен плоскости падения, то

$$\sigma_{HH}^{\perp}(\varphi_1) = B^{\perp}(\varphi_1)B^{\perp}(\varphi_1)^* \cos^3 \varphi_1, \quad \sigma_{HV}^{\perp}(\varphi_1) = B^{\perp}(\varphi_1)B^{\perp}(\varphi_1)^* \cos^2 \varphi_1 \sin \varphi_1, \quad (2)$$

$$B^{\perp}(\varphi_1) = T_{12}^{\perp}(\varphi_1)T_{21}^{\perp}(\varphi_1)e^{-2ik_2h_2} \left[ 1 - GF(\varphi_1) \frac{V_{12}^{\perp}(0)[1 - T_{12}^{\perp}(0)T_{21}^{\perp}(0)e^{-4ik_2h_2}]}{T_{12}^{\perp}(0)T_{21}^{\perp}(0)e^{-2ik_2h_2}} \right],$$

$$T_{12}^{\parallel\perp}(\varphi_1) = 1 + V_{12}^{\parallel\perp}(\varphi_1), \quad T_{21}^{\parallel\perp}(\varphi_1) = 1 + V_{21}^{\parallel\perp}(\varphi_1), \quad V_{21}^{\parallel\perp}(\varphi_1) = -V_{12}^{\parallel\perp}(\varphi_1),$$

$$V_{12}^{\parallel\perp}(\varphi_1) = \frac{Z_1^{\parallel\perp} \cos \varphi_1 - Z_2^{\parallel\perp} \cos \varphi_2}{Z_1^{\parallel\perp} \cos \varphi_1 + Z_2^{\parallel\perp} \cos \varphi_2} e^{-2ik_1^2 \Delta^2 \cos^2 \varphi_1}, \quad Z_{1,2}^{\parallel} = \sqrt{\frac{1}{\varepsilon_{1,2}}}, \quad Z_{1,2}^{\perp} = \sqrt{\varepsilon_{1,2}},$$

$$\cos \varphi_2 = \sqrt{1 - \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \sin^2 \varphi_1}, \quad k_1 = \frac{\omega}{c} \sqrt{\varepsilon_1}, \quad k_2 = \frac{\omega}{c} \sqrt{\varepsilon_2(\omega)}, \quad h_2 = \frac{\alpha}{Jmk_2} \quad - \text{максимальная}$$

толщина поверхностного слоя второй среды эффективно переизлучающего и излучающего электромагнитные волны, параметр  $\alpha$  в зависимости от почвенного покрова может принимать значения  $\alpha \approx 0,5 \div 1$ . В частности, для металла и водной среды  $\alpha \approx 1$ , это следует из экспериментальных данных.

Если высоты неровностей границы раздела распределены по нормальному закону со среднеквадратическим отклонением  $\Delta$ , то шероховатость поверхности в (1) и (2) учитывается множителем  $e^{-2ik_1^2 \Delta^2 \cos^2 \varphi_1}$  [11].

Несмотря на некоторую громоздкость приведенных формул, из них следует четкий физический смысл. Поле, поступающее в приемник радара, представляет собой суперпозицию полей отраженного границей и переизлученного из объема среды (объемное рассеяние).

Обозначения коэффициентов обратного рассеяния,  $\sigma_{VV}^{\parallel}(\varphi_1)$  означает излучение и прием поля с вертикальной поляризацией,  $\sigma_{VH}^{\parallel}(\varphi_1)$  - излучение вертикально поляризованного поля, прием горизонтально поляризованного излучения; обозначения  $\sigma_{HH}^{\perp}(\varphi_1)$ ,  $\sigma_{HV}^{\perp}(\varphi_1)$  расшифровываются аналогично.

Из приведенных выражений следует важный вывод: обратное отражение возбуждается не только при шероховатых поверхностях, но и в случае ровных границ раздела при углах падения  $0 \leq \varphi \leq \pi/2$ . Существующие в настоящее время электродинамические модели обратного отражения не учитывают этот эффект [1-6].

На рис.1. показана теоретическая и экспериментальная зависимость коэффициентов обратного отражения  $\sigma_{VV}^{\parallel}(\varphi_1)$  (сплошная кривая и темные ромбики) и  $\sigma_{HH}^{\perp}(\varphi_1)$  (пунктирная кривая и светлые ромбики) от угла падения (облучения)  $\varphi_1$ .

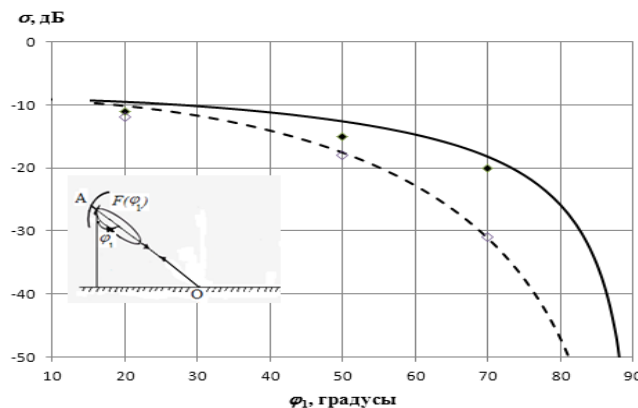


Рис. 1. Угловая зависимость коэффициента обратного рассеяния песчаной среды.

Первая среда здесь – атмосфера, вторая – песчаная с  $\epsilon_2 = 3,1 - i0,05$ , частота излучения  $f = 35$  ГГц, СКО неровностей  $\Delta = 0,6$  мм. Расчеты выполнены по формулам (1) и (2), экспериментальные данные заимствованы из [14].

Из рисунка видно хорошее совпадение теоретических и экспериментальных данных.

На рис.2. показаны теоретические и экспериментальные угловые зависимости радиояркостных температур:  $T_b^{\parallel}(\varphi_1)$  (сплошная линия и кружки),  $T_b^{\perp}(\varphi_1)$  (пунктирная линия и окружности), в случае граничащих сред: атмосфера – водная среда.

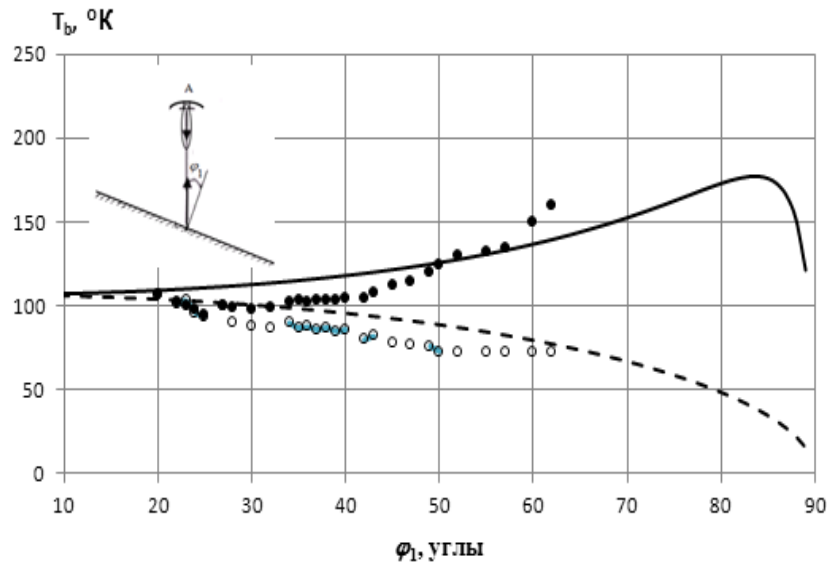


Рис. 2. Угловые зависимости радиояркостной температуры моря

Отметим особенности получения данных результатов. Во-первых, расчетные результаты получены по формулам  $T_b^{\parallel}(\varphi_1) = T_b^{\parallel}(0) \sqrt[4]{\frac{\sigma_{vv}(\varphi_1)_1}{\sigma_{vv}(0)_1}}$ ,

$T_b^{\perp}(\varphi_1) = T_b^{\perp}(0) \sqrt[4]{\frac{\sigma_{hh}(\varphi_1)_1}{\sigma_{hh}(0)_1}}$ , которые следуют из [12]. Во-вторых, экспериментальные

данные – это данные измерений, выполненные спутниковой системой SMOS [13] при облучении морской поверхности частотой  $f = 1,4$  ГГц, при этом методика измерений эквивалентна схеме, когда направление облучения постоянно, а наклон зондируемой поверхности изменяется. Поэтому в последних выражениях  $\sigma_{vv}(\varphi_1)_1 = B^{\parallel}(\varphi_1) B^{\parallel}(\varphi_1)^*$ ,  $\sigma_{hh}(\varphi_1)_1 = B^{\perp}(\varphi_1) B^{\perp}(\varphi_1)^*$ . В расчетах дисперсионные свойства воды учитывались по формуле Дебая.

Сравнение расчетных и экспериментальных данных показывает их хорошее согласие. Характерной особенностью в угловой зависимости на рис.2 является наличие максимума  $T_b^{\parallel}(\varphi_1 \approx 83,08^\circ)$ . Появление максимума радиояркостной температуры связано с тем, что при угле Брюстера практически отсутствуют потоки энергии, отраженные от границы, как в первую, так и во вторую среды, поэтому остается только усиленный поток из второй среды в направлении радиометра.

## Литература

1. Радиолокационные методы исследования Земли. Под редакцией Ю.А. Мельник. Изд-во: Сов. радио. М.: 1980. с. 264
2. Волосюк В.К., Кравченко В.Ф. Статистическая теория радиотехнических систем дистанционного зондирования и радиолокации. Изд-во «Физматлит». М.: 2008. с. 479.
3. Кошелев В.И., Петкун А.А., Тарковский В.М. Влияние характеристик среды со случайно неоднородной поверхностью и геометрии приемной решетки на обнаружение металлических объектов // Изв. вузов. Физика. Томск, 2013. Т.56. № 8/2. С. 160-163.
4. Подосенов С.А., Потапов А.А., Соколов А.А. Импульсная электродинамика широкополосных радиосистем и поля связанных структур. Изд-во «Радиотехника». М.: 2003. с. 173.
5. Шутко А.М. СВЧ – радиометрия волной поверхности и почвогрунтов. М.: Наука, 1986. с. 190.
6. Комаров С.А., Миронов В.Л. Микроволновое зондирование почв. Новосибирск. Из-во СО РАН. 2000 г. 257 с.
7. Раутиан С.Б. Об отражении и преломлении на границе среды с отрицательной групповой скоростью // УФН. 2008. Т.178. №10. С.1017-1024.
8. Шорохова Е.А., Кашин А.В. Некоторые особенности рассеяния электромагнитных волн на статистически неровных земных покровах в миллиметровом диапазоне длин волн // Изв. Вузов. Радиофизика. Т. XLVIII. № 6. 2005. С.478-487.
9. Ломухин Ю.Л. Многомодовая структура волн в граничащих однородных средах // Изв. вузов. Физика. Томск, 2013. № 8/2. С. 27-30.
10. Зельдович Б.Я., Пилипцикий Н.Ф., Шкуров В.В. Обращение волнового фронта. М.: Наука. Гл. редакция физ. – мат. лит-ры, 1985, - 240 с.
11. Басс Ф.Г., Фукс И.М. Рассеяние волн на статистически неоднородной поверхности. Изд-во «Наука». М.: 1972. с. 191.
12. Ломухин Ю.Л. Радиояркая температура и коэффициент обратного рассеяния // Вестник СибГАУ. Красноярск, 2013. №5(51). С. 141-143.
13. Дагуров П.Н., Дмитриев А.В., Базаров Ф.В., Раднаева С.Б. Результаты измерений радиояркой температуры на территории Бурятии космическим радиометром SMOS // Вестник СибГАУ. Красноярск, 2013. №5(51). С.22-26.
14. Adib Nashashibi, Fawwar T. Ulaby and Kamal Sarabandi. Measurement and Modeling of the Millimeter-Wave Backscatter Response of Soil Surfaces // IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing. 1996. Vol.34. № 2.