

Оценка частотных и угловых зависимостей коэффициентов отражения от почвенно-лесных покровов Земли

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

Институт физического материаловедения СО РАН, Улан-Удэ, Россия

E-mail: evgeniy_atutov@mail.ru

В работе построена электродинамическая модель коэффициента отражения почвенно-лесного покрова, представляющего собой трехслойную структуру: атмосфера – лес – почва. Лес моделируется слоем, состоящим из случайно расположенных композитных цилиндрических элементов с анизотропной диэлектрической проницаемостью. Исследованы частотные и угловые зависимости коэффициента отражения. Проведено сравнение с экспериментальными данными.

Ключевые слова: коэффициент отражения, анизотропный почвенно-лесной слой, случайная дискретная среда.

Введение

В настоящее время пристальное внимание уделяется изучению механизмов распространения электромагнитных волн различных частотных диапазонов (Chukhlantsev et al., 2003; Новик, 2007) в растительных средах в целях дистанционного зондирования Земли.

По подходам описания распространения волн в лесных средах физические модели можно разбить на два типа. Первым из них является приближение слоев; он заключается в представлении леса в виде слоев с эффективной диэлектрической проницаемостью. Такое моделирование допустимо, когда длина волны облучающего излучения много больше размеров деревообразующих элементов или же в случае очень густого леса (Якубов и др., 2001). Очевидно, что в случае высоких частот данный подход малопригоден. В частности, в (Li, 1997) отмечается, что приближение слоев для тропических лесов можно применять для частот не более 250 МГц.

Другой тип заключается в представлении лесной среды совокупностью случайно расположенных рассеивателей (стволы, ветви). Данные модели применимы при любых соотношениях между длиной волны и плотностью структуры. Кроме того, в них может быть снято ограничение на величину флуктуирующей составляющей диэлектрической проницаемости. Однако здесь ввиду усреднения по ансамблям реализаций положений рассеивающих элементов и не замкнутости выражения результирующего поля (вычисление ряда многократного рассеяния) вычисления становятся трудоемкими, что затрудняет их применение на практике (Torrìco, Bertoni, 1998).

Целью данной работы является исследование отражательной способности почвенно-лесного покрова на основе предложенной авторами электродинамической модели леса в виде случайно расположенных композитных анизотропных цилиндрических элементов. При определении коэффициентов отражения данной модели применен метод погружения

в сплошную среду, который заключается в использовании равенства ряда однократного рассеяния при плотной упаковке рассеивающих элементов выражению поля для сплошной среды (Атутов, Ломухин, 2007).

Отражательная способность случайно дискретного анизотропного слоя

Схематично модель почвенно-лесного покрова представлена на *рис. 1*.

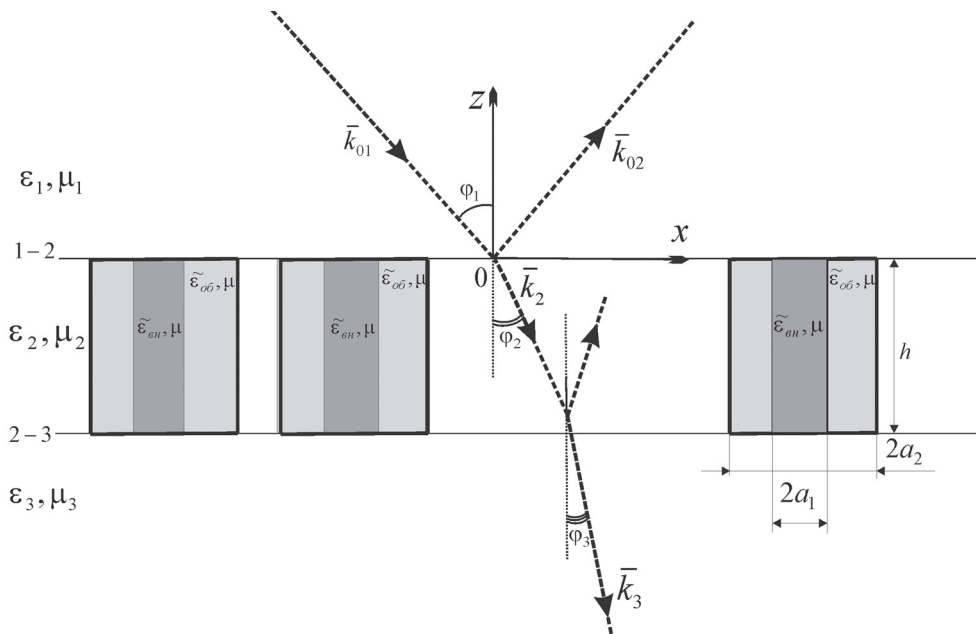


Рис. 1. Геометрия задачи

Как видно, это трехслойная структура. Область $z > 0$ типична с отбивками атмосфера с $\epsilon_1 = \epsilon'_1 - i\epsilon''_1$ и μ_1 . Область $z < -h$ типична с отбивками почва с $\epsilon_3 = \epsilon'_3 - i\epsilon''_3$ и μ_3 . Слой $-h \leq z \leq 0$ представляет собой сплошную среду с $\epsilon_2 = \epsilon'_2 - i\epsilon''_2$ и μ_3 (матрица), в которой распределены по закону Пуассона цилиндрические элементы (неоднородности). Данными элементами моделируются деревья; причем внутренние цилиндры соответствуют стволам с радиусом a_1 , пространство между внутренним и внешним цилиндром a_2 соответствует кроне.

Деревья, как известно, являются электрически анизотропными структурами. Поэтому вводим тензорную эффективную диэлектрическую проницаемость элементов:

$$\tilde{\epsilon} = \frac{\tilde{\epsilon}_{вн} v_1 + \tilde{\epsilon}_{об} v_2}{v_1 + v_2} = \left(\frac{a_1}{a_2} \right)^2 (\tilde{\epsilon}_{вн} - \tilde{\epsilon}_{об}) + \tilde{\epsilon}_{об}. \quad (1)$$

Здесь $\tilde{\epsilon}_{вн}$ – тензор комплексной диэлектрической проницаемости (КДП) ствола; $\tilde{\epsilon}_{об}$ – тензор КДП оболочки; v_1 и v_2 – объем, соответственно, внутреннего ствола и оболочки. Формула (1) записана аналогично первому члену разложения диэлектрической проницаемости смеси (Ландау, Лившиц, 1957).

Коэффициент отражения структуры на *рис. 1* определялся по методике, представленной в работе (Бреховских, 1957), однако предварительно решалась задача о среднем поле

в случайной дискретной среде (Агутов, Ломухин, 2009). Далее, решая граничную задачу, приходим к выражению для коэффициента отражения:

$$V_{\parallel,\perp} = \frac{V_{1-2,\parallel,\perp} + V_{2-3,\parallel,\perp} \exp(2ik_{2z,\parallel,\perp}h)W_{\parallel,\perp}^2}{1 + V_{1-2,\parallel,\perp}V_{2-3,\parallel,\perp} \exp(2ik_{2z,\parallel,\perp}h)W_{\parallel,\perp}^2}. \quad (2)$$

Здесь:

$$W_{\parallel,\perp} = \exp(i(k_{1z} - k_{2z,\parallel,\perp}))(1 - \beta) + \beta,$$

$$\beta = \sqrt{\left(\frac{p_{np}}{p}\right)^3} \exp[i(p - p_{np})] \frac{\sum_{n=0}^{\infty} (i)^{-n} J_n(p)}{\sum_{n=0}^{\infty} (i)^{-n} J_n(p_{np})} \sqrt{2} \exp\left(-\frac{\pi}{4}\right) \int_0^C \exp\left(-\frac{\pi}{2}t^2\right) dt,$$

$$p = \frac{k_1}{2\sqrt{\sigma}}, \quad p_{np} = \frac{k_1}{2\sqrt{\sigma_{np}}}, \quad \sigma_{np} = \frac{1}{4a_2^2}, \quad C = \sqrt{\frac{1}{\pi p}} k_1 h.$$

$$k_{2z,\parallel,\perp} = k_{2,\parallel,\perp} \cos \varphi_{2,\parallel,\perp}, \quad k_{2,\parallel} = \sqrt{k_{2,\perp}^2 + k_1^2 \sin^2(\varphi_1) \left(1 - \frac{\varepsilon_{\perp}}{\varepsilon_{\parallel}}\right)}, \quad k_{2,\perp} = \omega \sqrt{\varepsilon_{\perp} \mu_a}, \quad k_{1z} = k_1 \cos(\varphi_1),$$

$$\cos \varphi_{2,\parallel,\perp} = \sqrt{1 - \left(\frac{k_1}{k_{2,\parallel,\perp}}\right)^2 \sin^2(\varphi_1)}, \quad k_1 = \omega \sqrt{\varepsilon_1 \mu_1},$$

$\varphi_1, \varphi_{2,\parallel,\perp}$ – углы падения и преломления на границе 1–2; $V_{1-2,\parallel,\perp}, V_{2-3,\parallel,\perp}$ – коэффициенты отражения на границе 1–2 и 2–3, k_1 – волновое число в свободном пространстве, σ – плотность расположения элементов. Индексом p снабжаются параметры, соответствующих максимальной (предельной) упаковке цилиндров. При данной плотности слой можно считать сплошным. Знак \parallel относится к случаю, когда вектор \vec{E} падающего на структуру поля параллелен плоскости падения, \perp – вектор \vec{E} перпендикулярен ей. В (2)

$$V_{1-2,\parallel} = \frac{\sqrt{\frac{\mu_1}{\varepsilon_1}} \cos \varphi_1 - \left[\sqrt{\frac{\mu_2}{\varepsilon_2}} (1 - \beta) \cos \varphi_2 + \frac{k_{2,\parallel}}{\omega \varepsilon_{\perp}} \beta \cos \varphi_{2,\parallel} \right]}{\sqrt{\frac{\mu_1}{\varepsilon_1}} \cos \varphi_1 + \left[\sqrt{\frac{\mu_2}{\varepsilon_2}} (1 - \beta) \cos \varphi_2 + \frac{k_{2,\parallel}}{\omega \varepsilon_{\perp}} \beta \cos \varphi_{2,\parallel} \right]},$$

$$V_{1-2,\perp} = \frac{\sqrt{\frac{\varepsilon_1}{\mu_1}} \cos \varphi_1 - \left[\sqrt{\frac{\varepsilon_2}{\mu_2}} (1 - \beta) \cos \varphi_2 + \sqrt{\frac{\varepsilon_{\perp}}{\mu}} \beta \cos \varphi_{2,\parallel} \right]}{\sqrt{\frac{\varepsilon_1}{\mu_1}} \cos \varphi_1 + \left[\sqrt{\frac{\varepsilon_2}{\mu_2}} (1 - \beta) \cos \varphi_2 + \sqrt{\frac{\varepsilon_{\perp}}{\mu}} \beta \cos \varphi_{2,\parallel} \right]},$$

$$V_{2-3,\parallel} = \frac{\sqrt{\frac{\mu_2}{\varepsilon_2}} (1 - \beta) \cos \varphi_2 + \frac{k_{2,\parallel}}{\omega \varepsilon_{\perp}} \beta \cos \varphi_2 - \frac{k_3}{\omega \varepsilon_3} \beta \cos \varphi_3}{\sqrt{\frac{\mu_2}{\varepsilon_2}} (1 - \beta) \cos \varphi_2 + \frac{k_{2,\parallel}}{\omega \varepsilon_{\perp}} \beta \cos \varphi_2 + \frac{k_3}{\omega \varepsilon_3} \beta \cos \varphi_3},$$

$$\cos \varphi_3 = \sqrt{1 - \left(\frac{k_0}{k_3}\right)^2 \sin^2(\varphi_1)}, \quad k_3 = \omega \sqrt{\varepsilon_3 \mu_3},$$

$$V_{2-3,\perp} = \frac{\sqrt{\frac{\varepsilon_2}{\mu_2}}(1-\beta)\cos\varphi_2 + \sqrt{\frac{\varepsilon_{\perp}}{\mu}}\beta\cos\varphi_2 - \sqrt{\frac{\varepsilon_3}{\mu_3}}\beta\cos\varphi_3}{\sqrt{\frac{\varepsilon_2}{\mu_2}}(1-\beta)\cos\varphi_2 + \sqrt{\frac{\varepsilon_{\perp}}{\mu}}\beta\cos\varphi_2 + \sqrt{\frac{\varepsilon_3}{\mu_3}}\beta\cos\varphi_3},$$

где ε_{\perp} и ε_{\parallel} – компоненты тензора (1).

Из приведенных соотношений следует, что если $\sigma = \sigma_{np}$, то (2) – это коэффициент отражения трехслойной структуры со сплошным анизотропным слоем. Далее, если положить $\varepsilon_{\perp} = \varepsilon_{\parallel}$, то (2) – это коэффициент отражения изотропной трехслойной структуры.

В реальных условиях границы 1–2 и 2–3 почвенно-лесных покровов неровные. Для учета неровностей границ в (2) вместо коэффициентов $V_{1-2,\parallel,\perp}$, $V_{2-3,\parallel,\perp}$ следует считать $V_{1-2,\parallel,\perp} \exp(-2\Delta_{1-2}^2 k_{1z}^2)$, $V_{2-3,\parallel,\perp} \exp(-2\Delta_{2-3}^2 k_{1z}^2)$ (Басс, Фукс, 1972).

Численные и экспериментальные результаты

На *рис. 2* приведен пример рассчитанной по (2) зависимости среднего значения модуля коэффициента отражения почвенно-лесного покрова от частоты облучающего поля при различных плотностях древостоя. Расчет выполнен для нормального падения плоской волны ($\varphi_i=0$). Размер деревьев: средний радиус стволов – 0,09 м, средний радиус кроны – 1,58 м, средняя высота леса – 10 м. Почва представляет собой смесь глины (13%), песка (77%) и воды (8%). Дисперсионные свойства данной структуры учитывалось согласно (Мигонюв, Вобров, 2009). Частотная зависимость КДП древесины задана согласно (Ulaby et al., 1990) для случая температуры окружающей среды $t=20^{\circ}\text{C}$, объемной концентрации воды $m_v=0,1$. Предполагалось также, что $\varepsilon_1 = \varepsilon_2$, т.е. сплошная среда в слое и атмосфера имеет одинаковые КДП. Кроме того, было положено, что все среды немагнитные, $\mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu = \mu_0$.

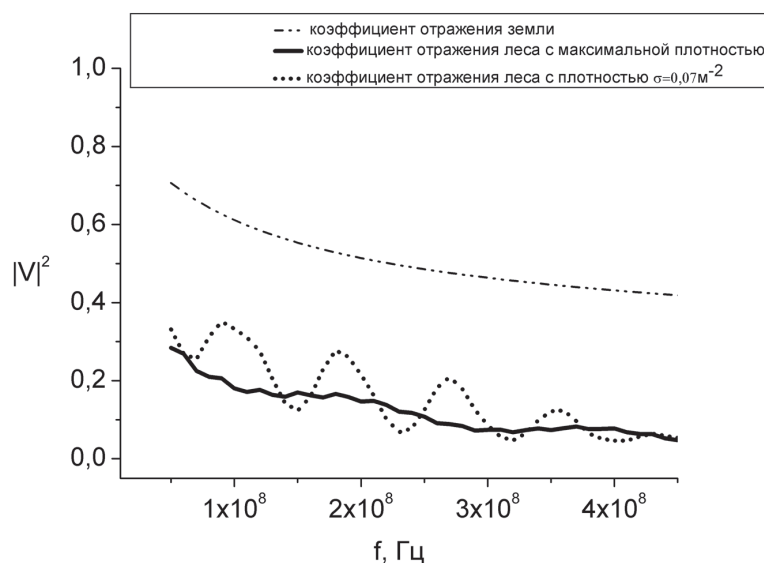


Рис. 2. Частотная зависимость коэффициентов отражения

Из рис. 2 видно, что наличие лесного покрытия существенно уменьшает отражающие свойства почвенно-лесного покрова. При плотностях древостоя меньших предельной (редколесье) зависимость коэффициента отражения от частоты носит осциллирующий характер, при этом амплитуда осцилляций затухает с ростом частоты.

На рис. 3 показаны угловые зависимости коэффициентов отражения почвенно-лесного покрова при облучении его полем частотой $f = 1,3$ ГГц. Рис. 3а относится к случаю, когда вектор \vec{E} падающего излучения лежит в плоскости падения (вертикальная поляризация), рис. 3б относится к случаю горизонтальной поляризации. На рис. 3 приведены экспериментальные данные для углов близких к скользким, поскольку именно для такой геометрии удалось найти экспериментальные данные (Редькин и др., 1973; Черный и др., 1983). Для данного диапазона частот было принято $\varepsilon_{\perp}(\omega) \approx \frac{1}{3}\varepsilon_{\parallel}(\omega)$, что следует из (Торговников, 1986).

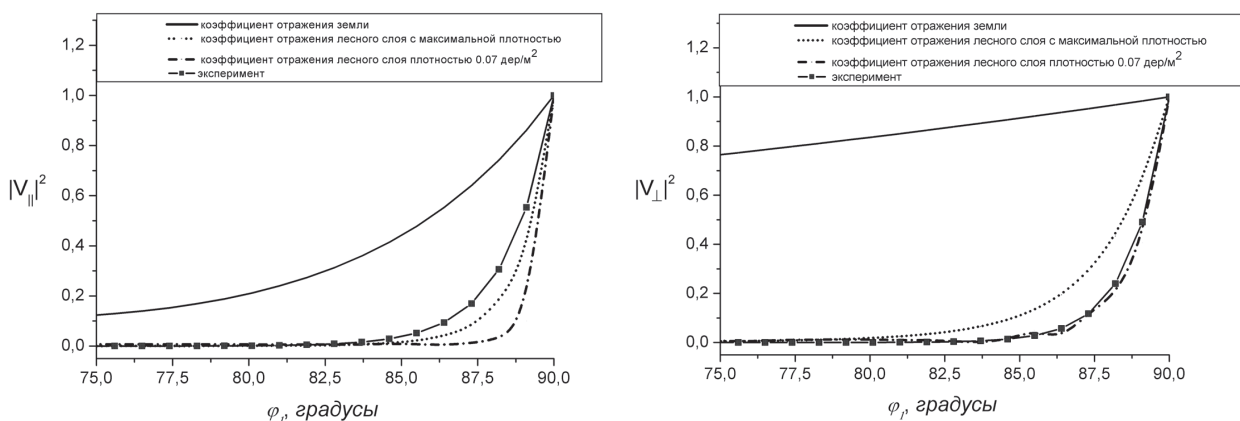


Рис. 3. Угловая зависимость коэффициентов отражения:
а – вертикальная поляризация; б – горизонтальная поляризация

Из приведенных результатов видно, что в данном случае наличие хвойного леса в почвенно-лесном покрове при всех углах (кроме близких к скользкому) существенно уменьшает зеркальное отражение. Кроме того, из графиков видно достаточно хорошее согласие расчетных и экспериментальных данных.

Заключение

В работе построена электродинамическая модель коэффициента отражения почвенно-лесного покрова. Показано, что наличие соснового леса существенно уменьшает отражающие свойства по крайней мере в диапазоне частот 100–450 МГц.

На высоких частотах коэффициент отражения резко возрастает при углах падения, близких к скользким.

В случае леса с плотностью $\sigma < \sigma_{np}$ зависимость коэффициента отражения почвенно-лесного покрова носит осциллирующий характер.

Необходимо отметить, что предлагаемая в работе модель, очевидно, имеет недостатки, поскольку, в частности, реальные среды (почва, лес) чаще всего являются неоднородными, а во-вторых, размеры рассеивающих элементов могут быть сравнимы или больше длины волны.

Литература

1. *Атутов Е.Б., Ломухин Ю.Л.* Среднее поле в лесной среде // Радиотехника и электроника. 2007. Т. 52. № 11. С. 1360–1366.
2. *Басс Ф.Г., Фукс И.М.* Рассеяние волн на статистически неровной поверхности. Т. 8. М.: Наука, 1972. 424 с.
3. *Бреховских Л.М.* Волны в слоистых средах. М.: Наука, 1957. 503 с.
4. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Электродинамика сплошных сред. Т. 8. М.: Наука, 1982. 620 с.
5. *Ломухин Е.Б., Атутов Е.Б.* Отражение и прохождение плоских волн на границе анизотропных случайных дискретных сред // ЖТФ. 2009. Т. 79. № 6. С.135–140.
6. *Новик С.Н.* Исследование взаимодействия электромагнитного излучения с лесным пологом: Дисс. ... канд. физ.-мат. наук (спец. 01.04.03). Томск, 2007. 197 с.
7. *Редькин Б.А., Ключко В.В., Очерет Ж.Г.* Теоретические и экспериментальные исследования коэффициентов отражения от растительных покровов при малых углах скольжения // Изв. Вузов. Радиофизика. 1973. Т. 16. № 8. С. 1172–1174.
8. *Торговников Г.И.* Диэлектрические свойства древесины. М.: Лесная промышленность, 1986. 128 с.
9. *Черный Ф.Б., Бахвалов Б.Н., Пузанков А.Е., Давыдов И.Б.* Распространение над лесом ультракоротких радиоволн // Межведомственное совещание по распространению ультракоротких радиоволн и электромагнитной совместимости: Тезисы докладов. Улан-Удэ: Из-во БФ СО АН СССР, 1983. С. 163–165.
10. *Якубов В.П., Тельпуховский Е.Д., Чуйков В.Д., Булахов М.Г., Мальшев Д.В.* Векторная структура излучения, отраженного лесным покровом Земли // Журнал радиоэлектроники. 2000. № 12.
11. *Chukhlantsev A.A., Shutko A.M., Golovachev S.P.* Attenuation of electromagnetic waves by vegetation canopies in the 100–10000 MHz frequency band // Journal of Radio Electronics. 2003. № 2. <http://jre.cplire.ru/jre/feb03/4/text.html>
12. *Li L.-W.* Radio wave propagation along mixed paths through a four-layered model of rain forests: an analytic approach // IEEE Trans. Antennas and Propagation. 1998. No. 7. V. 46. P. 1098–1110.
13. *Mironov V., Bobrov P.* Spectroscopic microwave dielectric model of moist soils // Advances in Geoscience and Remote Sensing. G. Jedlovec (Ed.). InTech. 2009. P. 279–302.
14. *Torrice S.A., Bertoni H.L.* Modeling tree effects on path loss in a residential environment // IEEE Transaction on Antennas and Propagation. 1998. V. 46. No. 6. P. 872–880.
15. *Ulaby F.T., Sarabandi K., McDonald K., Whitt M., and Dobson M.C.* Michigan microwave canopy scattering model // Int. J. Remote Sensing. 1990. 11 (7). P. 1223–1253.

Evaluation of frequency and angular dependence of the reflectance from the soil and forest cover of the Earth

Yu.L. Lomukhin, E.B. Atutov, V.P. Butukhanov

Institute of Physical Materials Science SB RAS, Ulan-Ude, Russia

E-mail: evgeniy_atutov@mail.ru

In work the electrodynamics model of the reflection coefficient of soil and forest cover is constructed. Which consist of a three-layer structure: the atmosphere-forest-soil. Forest modeled layer consisting of randomly arranged composite cylindrical elements with anisotropic dielectric permittivity. The frequency and angular dependence of the reflectance were estimated. A comparison with experimental data are carried out.

Keywords: coefficients of reflection, anisotropic layer of soil and forest, random discrete medium.