

Электродинамические модели распространения радиоволн в лесу

В.А. Пермяков

Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт» (НИУ «МЭИ») 111250, Россия, Москва, Красноказарменная ул., 14, E-mail PermyakovVA@mpei.ru

Проведен обзор электродинамических моделей и методов анализа распространения радиоволн в лесных массивах, представляющих интерес для решения задач радиосвязи, локации, навигации и дистанционного зондирования.

The electromagnetic models and the methods for the analysis of radiowave propagation in forest that are of interest for communication, radar, navigation and remote sensing are reviewed.

Введение

Влияние леса на распространение радиоволн – актуальная тема исследований, стимулируемых практическими приложениями, связанными с работой различных радиотехнических систем. Наибольший интерес в настоящее время представляет исследование влияния леса на распространение радиоволн (РРВ) метрового – сантиметрового диапазонов. Практические задачи РРВ в этих диапазонах: различные виды радиосвязи (мобильная, радиорелейная и т.д.), радиолокация, радионавигация, дистанционное зондирование земных покровов, геодезические задачи, решаемые радиометодами. В настоящем обзоре основное внимание будет уделено анализу РРВ в лесу при малых углах места.

Характеристики леса как среды распространения

Лес представляет собой случайно неоднородную диэлектрическую среду, основными структурными элементами которой являются листва, ветви и стволы деревьев.

Для изучения диэлектрических характеристик леса применяют два основных подхода. Первый подход – представление леса, как диэлектрической среды с потерями, характеризуемой некоторой эффективной диэлектрической проницаемостью (ЭДП) [1-7]. Количественные значения ЭДП могут быть получены из экспериментальных данных: либо из натуральных измерений РРВ в лесу [1-3], либо из измерений ДП отдельных структурных элементов (листвы, веток, стволов) [4-7] с последующим осреднением ДП по объемам, содержащим структурные элементы одного или нескольких видов. Второй подход – определение элементов матрицы рассеяния или ЭПР отдельных структурных элементов леса с использованием данных об их диэлектрических и геометрических характеристиках [4-6, 8-10]. Оба подхода тесно увязаны с анализом различных электродинамических моделей распространения и затухания радиоволн в лесу: первый – с использованием плоскостойких регулярных моделей леса, второй – с использованием статистических или комбинированных моделей РРВ в лесу.

Экспериментальные данные по ЭДП леса существенно различаются в зависимости от таксономических характеристик леса, географических и климатических условий, времен года и т.д. Поэтому наибольший интерес для решения практических задач на территории России представляют данные для отечественных лесов. Такие исследования интенсивно проводились и проводятся учеными Москвы, Томска, Иркутска, Улан-Удэ. Экспериментальные данные по ЭДП и затуханию радиоволн в лесах России можно найти в [1-4], по характеристикам отдельных элементов и рассчитанных на их основе ЭДП и ЭПР – в [6-10].

Из зарубежных работ в этом направлении, позволяющих рассчитать ЭДП и ЭПР структурных элементов леса, отметим так называемую мичиганскую модель [5]. Эта эмпирическая модель основана на аппроксимации ДП таких структурных элементов леса, как листва, ветви, стволы, функциями, зависящими от частоты сигнала и параметров вещества (содержание свободной воды, частота релаксации). Как обычно в эмпирических моделях, модель [5] содержит ряд числовых параметров, которые определяются из эксперимента и отражают характеристики лесного массива, типичные для данной местности. Поэтому перенос результатов [5] на растительность с иными характеристиками проблематичен или вообще невозможен.

Электродинамические модели РРВ в лесу, анализируемые методом собственных функций

Значительное число работ, посвященных РРВ в лесу, выполнено в приближении, что лес с прилегающей к нему поверхностью может быть заменен бесконечной в горизонтальном направлении многослойной плоскостройной средой. Источником, возбуждающим эту среду, может быть антенна, расположенная как внутри леса, так и над лесом. Чаще всего в качестве антенн рассматриваются элементарные вибраторы, вертикальные, горизонтальные либо наклонные.

В порядке нарастания сложности рассматриваются следующие модели леса.

1. Трехслойная изотропная модель: однородное диэлектрическое полупространство с потерями, моделирующее Землю, плоский изотропный слой диэлектрика с потерями, моделирующий лес, однородное пространство над лесом.

2. Трехслойная анизотропная модель леса: лес рассматривается, как анизотропный диэлектрик с диагональным тензором ДП. Анизотропия ДП в данной модели вводится, чтобы описать влияние стволов деревьев, которые перпендикулярны поверхности Земли, поэтому такая модель учитывает различную реакцию леса на поля вертикальной и горизонтальной поляризации.

3. Четырехслойная изотропная модель: в этой модели эффективная ДП верхней части леса определяется в основном листвой и ветвями, нижней части леса – стволами деревьев.

4. Четырехслойная анизотропная модель: в этой модели также вводится двухслойное описание леса: в верхней части леса доминируют листва и ветви, в нижней части леса – стволы деревьев, каждый из этих слоев описывается тензором ДП.

Решения электродинамических задач для всех перечисленных моделей могут быть получены единым методом – методом собственных функций (интегральных преобразований). Теоретические основы метода изложены во многих монографиях (см., например, [11]). По существу указанные задачи являются обобщениями классической задачи Зоммерфельда на плоскостройные среды.

Строгое решение указанных задач записывается в виде интегралов по спектру плоских или плоско цилиндрических волн. Строгое решение формально позволяет найти поле на любых расстояниях от источника, однако такой путь вычисления весьма трудоемок. Кроме того, результаты расчета полей по строгому решению трудно интерпретировать. Поэтому наибольшее распространение получил следующий подход: после получения строгого решения проводится его асимптотическое исследование. Из интегральных представлений поля выделяются с помощью асимптотических методов основные вклады в поле, имеющие четкий физический смысл. Методами перевала или стационарной фазы находится лучевое представление поля (приближение геометрической оптики (ГО)). Интегралы по разрезам дают боковые волны. Вычисление вкладов от полюсов интегральных представлений дает выражения для поверхностных, волноводных (в отсутствие потерь в среде) или, в общем случае, комплексных мод. Эти структуры полей формируются на больших расстояниях от

источника и локализованы в определенных областях пространства, что позволяет построить приближенное решение задачи, учитывающее основные механизмы распространения поля из точки передачи в точку приема.

Следует отметить факторы, осложняющие получение таких асимптотических представлений для моделей леса. Основная трудность связана с учетом потерь в лесу. Это означает, что ГО трактовка поля должна основываться на вычислении вкладов точек перевала (или стационарной фазы) в комплексном пространстве, что дает представление поля в виде неоднородных плоских волн или комплексных лучей. Аналогичные трудности возникают при вычислении волн, порождаемых интегралами по разрезу или полюсами. Вторая трудность связана с усложнением моделей по сравнению с классической моделью Зоммерфельда. Наконец, существует проблема выбора представления поля в многослойной среде: в виде мод или лучей. При большом числе мод или лучей наглядность представлений поля уменьшается.

С другой стороны, при наличии потерь в среде анализ РРВ в определенной степени упрощается. В суперпозициях лучей, боковых волн, мод можно выделить те, которые имеют минимальное ослабление и дают основной вклад в поле в точке наблюдения. Если мнимая часть ДП мала, можно использовать метод возмущений при вычислении вкладов точек перевала (точек стационарной фазы), пренебрегая потерями, что дает траектории лучей в действительном пространстве с учетом затухания на траекториях. Кроме того, моды можно описывать на лучевом языке в соответствии с концепцией Бриллюэна. Поэтому при анализе поля в многослойных структурах в большинстве случаев можно выделить три основных вклада: ГО лучей с минимальным затуханием, распространяющихся внутри леса без переотражений или с малым числом переотражений, боковых волн и квазиповерхностной волны, ведомой земной поверхностью.

Конкретные работы по РРВ в многослойных моделях леса.

По-видимому, первыми фундаментальными работами, посвященными РРВ в лесу, были работы Т.Тамира [12-14], в которых принята трехслойная модель и некоторые ее модификации. В [12] лес аппроксимируется изотропным поглощающим слоем в диапазоне частот 1-100 МГц. Учитывается боковая волна, антенны располагаются внутри слоя. В [13] в аналогичной модели учитывается отражение от поверхности земли.

В последующие годы было выполнено большое число работ по анализу РРВ в лесах, в основном в тропических. В [15] дан обзор работ по РРВ в лесах за период с 1960 по 2009 гг. Наиболее полными с методической точки зрения являются работы [16,17] по 4-х слойной изотропной модели леса, на которых мы остановимся подробнее. В этих работах получено строгое интегральное представление поля в векторной форме для наклоненного диполя, создающего как вертикальную, так и горизонтальную поляризации. Точки передачи и приема в лесу: передатчик располагался на уровне стволов, приемник – на уровне стволов или в листве. Методом седловой точки изучено прямое и многолучевое распространение. Найдены боковые волны (БВ) и квазиповерхностные волны (КПВ) вдоль каждой из границ раздела. Проведено обсуждение сходимости выражений для выделенных структур полей. Найдено представление полей диполей в виде комплексных изображений по методу Прони (ближняя зона). Записано выражение для расчета потерь в лесу в виде суммы 5-ти слагаемых для каждой поляризации (ГО поле, три БВ и КПВ, ближнее поле). Показано, что полное поле может быть представлено в виде прямой волны, многократно отраженных волн и трех БВ и КПВ, причем главную роль играет БВ, формирующаяся вдоль границы воздух - листва. Проведена серия расчетов: отдельно потери по ГО, отдельно боковые волны, суммарные потери. Четко виден переход от ГО

потерь к потерям на БВ на расстоянии около 3 км. Расчеты проводились для частот 100, 500, 3000 МГц, расстояний 0,1-10 км. В отличие от отечественных данных приближение ГО действует на больших расстояниях, по-видимому из-за потерь боковых волн в дожде.

По аналогичной методике выполнена работа [18] для анизотропной 4-х слойной модели леса. Электрофизические параметры слоев леса в ней задаются диагональными тензорами ДП.

Результаты анализа плоскостойких моделей использовались для построения грубых инженерных моделей, учитывающих конечные (вдоль поверхности земли) размеры участков леса и дифракцию на крае леса в приближении тонкого идеально проводящего экрана [14, 23].

Электродинамические модели РРВ в лесу, анализируемые методом параболического уравнения

Метод параболического уравнения (МПУ) в применении к излучению элементарного источника над землей был предложен М.А. Леонтовичем [19,20]. Идея МПУ хорошо известна и обычно излагается в применении к скалярному двумерному уравнению Гельмгольца для функции $U(x,z)$, где x – горизонтальная, z – вертикальная прямоугольные координаты. U – комплексная амплитуда поля, временной множитель $\exp(i\omega t)$. Положим, что поле в направлении $x > 0$ может быть приближенно представлено плоской волной вида $U_0 = e^{-ik_0x}$. Уравнение Гельмгольца преобразуем

подстановкой $U(x,z) = e^{-ik_0x} V(x,z)$. Наложив требование на вторую производную функции V по переменной x $\left| \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} \right| \ll \left| \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} \right| \approx 2k_0 \left| \frac{\partial V}{\partial x} \right|$ и пренебрегая в исходном

уравнении для функции V второй производной V по x , получим параболическое уравнение

$$\frac{\partial^2 V}{\partial z^2} - 2ik_0 \frac{\partial V}{\partial x} + k_0^2 [\varepsilon(x,z) - 1] V = 0$$

Здесь $k_0 = 2\pi/\lambda_0$ и λ_0 – волновое число и длина волны в свободном пространстве, $\varepsilon(x,z)$ – относительная комплексная ДП среды.

При $\varepsilon=1$ и плоской границе ПУ имеет аналитическое решение, при $\varepsilon = \varepsilon(x,z)$ и нерегулярной границе для его решения приходится привлекать численные методы.

Численная реализация МПУ применяется к РРВ над поверхностью с переменным профилем местности, а также в неоднородной тропосфере при условии $|\varepsilon(x,z) - 1| \ll 1$. Можно полагать, что последнее условие будет справедливо и для леса при описании его усредненными электрофизическими параметрами, так как согласно экспериментальным данным действительная часть эффективной ДП леса близка к единице, а мнимая – мала.

Возможностью использования МПУ при нерегулярной границе и переменной ДП объясняется широкое использование МПУ для практических приложений. Применение МПУ к задачам распространения волн систематически изложено в монографии [21].

РРВ в лесу с помощью МПУ изучалось в небольшом числе работ. В [22] рассмотрено РРВ между антеннами, расположенными в гористой местности, покрытой лесом, в [23] – РРВ в пригороде в условиях малоэтажной застройки и влияния деревьев при малых высотах подъема антенн. В [22, 23] проведено сравнение расчетов ослабления по МПУ с экспериментальными данными.

Статистические модели

В последние годы интенсивно развиваются статистические модели РРВ в лесу [4-6, 8-10, 24-26]. Эти модели потенциально обладают более высокой степенью адекватности реальным средам на частотах свыше 200 МГц по сравнению с приближением ЭДП. Однако их построение и вычислительная реализация существенно сложнее, чем для моделей леса, описываемых регулярной ЭДП, что требует увязки статистических моделей с экспериментальными данными. Наиболее распространен подход, при котором стволы деревьев моделируются цилиндрами, бесконечно длинными либо конечной длины, ветви и хвоя — цилиндрами конечной длины, листья — плоскими круглыми дисками. Диэлектрическая проницаемость всех элементов полагается комплексной. Деревья считаются случайно расположенными, ветви и листья случайно ориентированными. Как правило, полагается, что плотность растительности невелика. Расчет характеристик поля проводится на основе теории распространения волн в среде со случайными дискретными рассеивателями в приближении однократного или многократного рассеяния. В простейшем случае при расчете энергетических характеристик поля рассматриваются отдельно процессы рассеяния на каждой группе элементов (листья, ветви, стволы), а далее суммируются вклады от разных типов рассеивателей. Для ряда приложений существен учет фазовых и поляризационных характеристик рассеянного поля, что усложняет расчетные модели леса [24-26].

Заключение.

Исследование РРВ в лесных массивах является актуальной и развивающейся областью радиофизики и радиотехники. Объем публикаций по этой тематике составляет сотни статей, поэтому мы ограничили обзор электродинамическими моделями леса и привели минимальное число ссылок. Более подробная библиография приведена в диссертациях и монографиях последних лет [6-10, 27].

Автор с признательностью вспоминает поддержку Н.А. Арманда при изучении вопросов РРВ в сложных условиях, а также благодарен А.А. Калинкевичу и А.А. Чухланцеву за полезные сообщения.

Литература

1. Доржиев Б.Ч., Плетнев В.И., Хомяк Е.М. Погонное ослабление метровых волн, распространяющихся в лесной среде.// Распространение электромагнитных волн: сб. статей. – Улан-Удэ, 1987, С.87-103.
2. Доржиев Б.Ч., Хомяк Е.М. Экспериментальные методы определения эффективных электрических параметров лесной среды в УКВ диапазоне.// XVIII Всероссийская конференция по распространению радиоволн. С-Петербург, 1996 г, Тезисы докладов, том 2, М., 1996 г., с. 439-440.
3. Б. В. Басанов, А. Ю. Ветлужский, В. П. Калашников. Метод определения эффективной диэлектрической проницаемости лесного полога. / Журнал Радиоэлектроники, № 4, 2010.
4. Чухланцев А.А., Шутко А.М., Головачев С.П. Ослабление электромагнитных волн растительными покровами. / Радиотехника и электроника, 2003, т.48, №11, с. 1285-1311.
5. Ulaby F.T., Sarabandi K., McDohald K., et al. Michigan microwave canopy scattering model. /Int. J. Remote Sensing, 1990, v.11, No 7, pp. 1223-1253.
6. Чухланцев А.А. СВЧ радиометрия растительных покровов. / Дисс. на соискание ученой степени д.ф.-м.н, М. 2004

7. Адякин Ю.Н. Метод расчета энергетических характеристик информационно-измерительных систем, работающих в растительных средах. /Дисс. на соискание ученой степени к.т.н., Тула, 2004
8. Магазинникова А.Л. Статистические методы расчета УКВ поля в лесных районах. / Дисс. на соискание ученой степени к.ф.м.н., Томск, 1998.
9. Новик С.Н. Исследование взаимодействия электромагнитного излучения с лесным пологом./ Дисс. на соискание ученой степени к.ф.м.н., Томск, 2007.
10. Атутов Е.Б. Отражающие и ослабляющие свойства лесных сред в метровом диапазоне волн. /Дисс. на соискание ученой степени к.ф.м.н., Томск, 2009.
11. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. –М.: Наука, 1983.
12. T.Tamir, On radio wave propagation in forest environments. IEEE Tr. AP, vol. AP-15, No. 6, pp. 806-817, Nov. 1967
13. D. Dence, T.Tamir. Radio loss of lateral waves in forest environments. Radio Sci. Vol.4, No.4, pp. 307-318, April 1969.
14. T. Tamir, Radio wave propagation along mixed paths in forest environments. IEEE Tr. AP, vol. AP-25, No. 4, pp. 471-477, July 1977.
15. Y.S.Meng, Y.H. Lee, B.C. Ng. Study of propagation loss prediction in forest environment. PIER B, vol.17, 117-133, 2009.
16. Li L.W., Yeo T.S., Kooi P.S., Leong M.S. Radio wave propagation along mixed paths through a four – layered model of rain forest: an analytical approach./ IEEE Trans. Antennas and Propagat., Vol. 46, No. 7, 1098-1111, 1998.
17. Koh J.H., Li L.W., Kooi P.S., Yeo T.S., Leong M.S. Dominant lateral waves in canopy layer of a four – layered forest. /Radio Sci., Vol. 34, No.3, 681—691, 1999.
18. Li L.W., Lee C.K., Yeo T.S., Kooi P.S., Leong M.S. Wave mode and path characteristics in an inhomogeneous anisotropic forest environment. / IEEE Trans. Antennas and Propagat., Vol. 52, No. 9, 2445-2455, 2004.
19. Леонтович М.А. Об одном методе решения задач о распространении электромагнитных волн вдоль поверхности земли. /Известия АН СССР, сер. физ., 1944, т.8, № 1, с.16.
20. Леонтович М.А., Фок В.А. Решение задачи о распространении электромагнитных волн вдоль поверхности земли по методу параболического уравнения. /ЖЭТФ, 1946, т. 16, вып.7, с. 557-573.
21. M. Levy. Parabolic equation methods for electromagnetic waves propagation. London, UK, IEE, 2000.
22. Holm P., Lundborg B., Å. Waerm. Parabolic equation technique in vegetation and urban environments. Report FOI-R-1050-SE, 2003
23. João F. de Souza, Fátima N. B. Magno, Zínia A. Valente, Jessé C. Costa, Gervásio P. S. Cavalcante. Mobile Radio Propagation along Mixed Paths in Forest Environment using Parabolic Equation. / Microwave and Optical Technology Letters, Vol. 51, Issue 4, pp. 1133–1136, April 2009
24. Sarabandy K., Il-Suek Koh A Complete Physics-Based Channel Parameter Simulation for Wave Propagation in a Forest Environment. // IEEE Trans. Antennas and Propagat., Vol. 49, No. 2, 260-271, 2001.
25. Sarabandy K., Il-Suek Koh Effect of Canopy–Air Interface Roughness on HF–VHF Wave Propagation in Forest. // IEEE Trans. Antennas and Propagat., Vol. 50, No. 2, 111-121, 2002.
26. Thirion L., Colin E., Dahon C. Capabilities of a Forest Coherent Scattering Model Applied to Radiometry, Interferometry and Polarimetry at P- and L-Band. // IEEE Trans on Geosci. and Remote Sensing Vol.. 44, No. 4, 849-862, 2006.

27. Chukhlantsev A.A. Microwave radiometry of vegetation canopies. Dordrecht, Nederland, Springer, 2006.