

Экспериментальное изучение условий формирования боковых волн в лесных покровах

© А.Ю. Ветлужский, В.П. Калашников

Институт физического материаловедения СО РАН,
670047 Улан-Удэ, Россия
e-mail: vay@iprms.bscnet.ru

(Поступило в Редакцию 1 июня 2012 г.)

Экспериментально исследованы особенности распространения волн VHF–UHF-диапазонов в лесах различного видового и структурного состава на малых дистанциях между погруженными в лесную среду антеннами. Выявлено определяющее влияние биометрических параметров лесной растительности и частоты излучения на возможность формирования боковых волн, распространяющихся вдоль верхней кромки леса. Показано, что традиционный подход к описанию ослабляющих свойств лесной среды через понятие погонного ослабления становится некорректным при наличии боковых волн.

Введение

В последние несколько десятилетий интенсивное развитие систем радиосвязи различного назначения, а также методов и средств дистанционного зондирования земной поверхности обуславливает неослабевающий интерес к изучению влияния лесных покровов на распространение электромагнитных волн различных диапазонов. Ключевым вопросом, который так или иначе рассматривается практически во всех работах, связанных с этой проблематикой, является оценка ослабления излучения, приносимого элементами лесной растительности [1]. Данная оценка необходима как для прогнозирования затухания радиосигналов в наземных радиоканалах, так и для разработки эффективных алгоритмов интерпретации данных дистанционного зондирования.

Величина ослабления поля может быть достоверно определена только при проведении натурных экспериментов. Однако лес — это гетерогенная, многокомпонентная среда, отличающаяся существенной неоднородностью внутренней структуры. При этом на характеристики волн, распространяющихся в такой среде, наряду с биометрическими показателями древостоя существенное влияние оказывают и сезонные вариации электрофизических параметров элементов растительности, наличие хвойно-листового опада, а также параметры почвенного покрова. Все это приводит к тому, что измерения, даже хорошо статистически обеспеченные и проведенные в пределах одних и тех же тестовых участков леса, но на разных трассах распространения, могут приводить к отличающимся результатам. Поэтому в целом влияние лесных покровов на распространение волн обычно описывается в значительной степени усредненными характеристиками, к числу которых относится погонное ослабление поля (пропорциональное коэффициенту экстинкции в предположении, что затухание поля носит экспоненциальный характер), определяемое для лесов с учетом их видового состава и внутренней структуры, а также поляризации излучения.

Для нахождения приближенных значений погонного ослабления наряду с постановкой экспериментов, целью которых является получение регрессионных зависимостей между этими значениями и характеристиками растительности, возможно использование теоретических построений. Базой для их разработки является выявление одного или нескольких физических механизмов, определяющих в основном процесс распространения излучения в лесной среде при заданных условиях. Несмотря на большое количество теоретических моделей, разработанных в настоящее время, к числу однополагающих можно отнести всего две из них.

Во-первых, это представление леса в виде одно- или многослойной стратифицированной среды [2,3]. В этом случае пренебрегается рассмотрением актов рассеяния излучения на отдельных элементах растительности, а электродинамические характеристики лесного покрова описываются скалярными либо тензорными значениями эффективной диэлектрической проницаемости. При таком подходе как в постановке задач дистанционного зондирования, так и при наземном расположении антенн используется многолучевое представление волновых процессов, описывающее прямое прохождение излучения через лес, отражение от границ земля–лес, лес–атмосфера и т.д., а следовательно, большое значение приобретает анализ взаимодействия поля с границами раздела слоистой структуры. Данные модели обычно используются, если длина волны превосходит характерные размеры объектов лесной среды.

Во-вторых, это описание лесного покрова в виде совокупности дискретных рассеивателей, в роли которых выступают стволы, ветви, листья и хвоя, ориентация и расположение которых являются случайными величинами как в пространстве, так и во времени [4–6]. При этом результирующее поле в лесу представляется в виде суперпозиции волн, одно- либо многократно рассеянных на элементах среды.

Говоря о первом из упомянутых подходов, следует особо отметить, что на практике для погруженных в

лесную среду антенн при взаимодействии поля с верхней кромкой леса возможно возбуждение боковых волн, представление о которых хорошо укладывается в рамки слоистой модели лесной среды. Волны такого типа возникают при падении излучения на границу раздела сред под углом полного внутреннего отражения и некоторую часть пути распространения скользят над верхней кромкой леса, не испытывая затухания из-за непосредственного взаимодействия с элементами растительности. Начиная с работ [2,3], а затем в более поздних [7,8], волны этого типа в лесных покровах исследовались теоретически и экспериментально. В настоящее время общепринято, что в VHF-диапазоне именно механизм боковой волны определяет в основном характеристики поля при значительном пространственной разности антенн. При этом, однако, в литературных источниках даются неоднозначные оценки максимальных частот, на которых возможно проявление волновых процессов такого типа. Так, в [3] говорится о возможности существования боковых волн на частотах до 100 MHz либо несколько больших, в [9] предполагается их существование на 300 MHz, а в [10] указывается на появление этих волн при зондировании лесной среды широкополосными импульсными сигналами со спектральной полосой 0.5–3.5 GHz.

Кроме того, остается практически не изученным вопрос о минимальных дистанциях, на которых возможно проявление боковых волн, т.е. о расстояниях между корреспондирующими антеннами, на которых уровень ослабления боковой волны становится меньше ослабления излучения, непосредственно распространяющегося сквозь толщу лесной растительности. Данный вопрос, на наш взгляд, является принципиальным, поскольку смена механизмов распространения влечет за собой изменение дистанционного поведения поля в лесной среде: экспоненциальный закон затухания, обусловленный эффектами поглощения и рассеяния элементами растительности и характерный для волн прямого прохождения, должен сменяться обратно пропорциональной квадрату расстояния зависимостью, типичной для боковых волн.

Поэтому только анализ возможности формирования боковых волн и определение дистанций погружения поля в лесную среду, на которых эти волны могут обнаруживаться, наряду со знанием непосредственного ослабляющего действия лесной растительности способны привести к верной оценке потерь излучения в лесах в VHF- и UHF-диапазонах.

Настоящая работа в той или иной степени посвящена рассмотрению всех этих вопросов. В разд.1 дается описание постановки экспериментов и приводятся результаты по радиопросвечиванию участков леса, имеющих различную структуру и видовой состав, на различных частотах. В разд. 2 настоящей работы обсуждаются полученные данные и приводятся аргументы в пользу их возможной интерпретации.

1. Постановка и результаты экспериментов

Эксперименты проводились в лесах Бурятии в период июнь–август 2011 г. Для исследований были выбраны два значительно отличающихся по видовому составу типа лесной растительности, произрастающей на данной территории. В свою очередь для каждого из данных типов при проведении измерений подбирались участки леса с различными биометрическими характеристиками.

Первый — смешанный лес — состоял из березы, кедра, сосны, лиственницы. Средняя плотность древостоя составляла 0.22 trees/m^2 , высота деревьев 15 m, диаметр стволов на уровне человеческого роста 0.25 m. Имелся редкий кустарник различных пород высотой 2–4 m.

Лес второго типа был хвойным — сосновым. Основной особенностью являлось отсутствие как подлеска, так и низкорасположенных ветвей, а также практически без исключений вертикальная ориентация стволов относительно земли. Толщина кроны составляла около трети общей высоты леса. Измерения проводились в двух лесных массивах такого типа с существенно отличающейся плотностью произрастания деревьев. В первом случае она в среднем составила 0.14 trees/m^2 , при этом высота и толщина стволов были равны 17 и 0.27 m соответственно. Во втором — лес был более редким с плотностью 0.075 trees/m^2 , высотой порядка 14 m и диаметром стволов 0.21 m.

Измерения проводились на частотах 150 и 600 MHz при вертикальной поляризации излучения. Выбор был обусловлен тем, что на нижней частоте длина волны оказывалась близкой к среднему расстоянию между деревьями, а на верхней была значительно меньше. В качестве приемной и передающей антенн использовались полуволновые симметричные вибраторы, которые устанавливались в лесу на высоте 2 m над землей. Функцию приемного устройства выполнял анализатор спектра Protek-3201N, сопряженный с компьютером.

Целью экспериментов являлось определение дистанционной зависимости поля в лесу при небольшом (до 200 m) пространственном разности антенн. Для достижения достаточной статистической обеспеченности результатов методика измерений строилась следующим образом. На каждой дистанционной отметке уровень сигнала фиксировался в семи точках, располагавшихся в пределах примерно равного длине волны участка поперек основной трассы распространения излучения. Таким образом, снижалось влияние на получаемые результаты местоположения приемной антенны относительно ближайших деревьев. Кроме того, в каждой из указанных точек данные записывались трекратно в течение 1 min, что позволяло уменьшить погрешность, связанную с ветровыми колебаниями элементов растительности. В итоге полученные значения уровня поля усреднялись.

На рис. 1 представлены результаты измерений, полученные в первом из исследовавшихся лесов на частоте 150 MHz. Здесь, как и на последующих рисунках,

данные нормированы к нулевому уровню на дистанции 10 м. Из графика следует, что характер дистанционной зависимости поля меняется при разnose антенн на 75–85 м. Здесь же приведены результаты аппроксимации двух участков данной кривой. Первый описывается функцией $\exp(-\alpha R)/R$, изображенной в полулוגарифмическом масштабе. Поведение второго участка

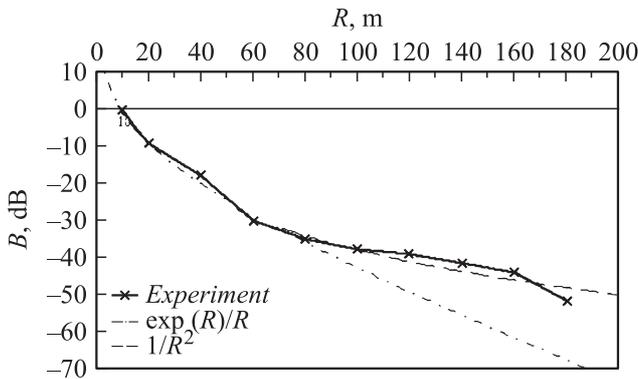


Рис. 1. Дистанционная зависимость поля в смешанном лесу с плотностью древостоя 0.22 trees/m^2 , полученная на 150 МГц, и результаты ее аппроксимации.

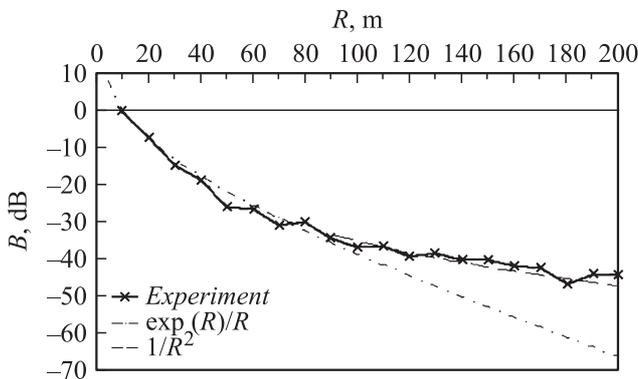


Рис. 2. Дистанционная зависимость поля (хвойный лес, плотность 0.14 trees/m^2 , частота 150 МГц) и результаты ее аппроксимации.

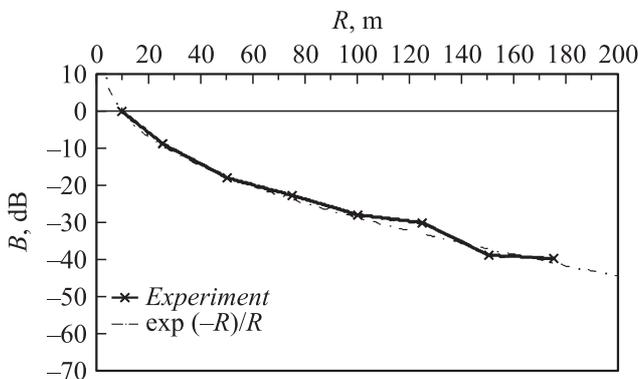


Рис. 3. Дистанционная зависимость поля (смешанный лес, плотность 0.22 trees/m^2 , частота 600 МГц) и результаты ее аппроксимации.

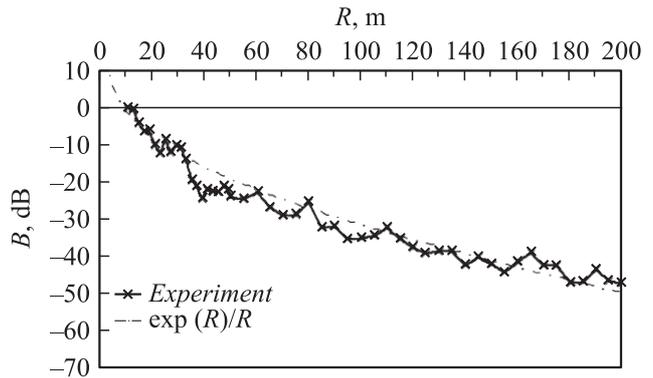


Рис. 4. Дистанционная зависимость поля (хвойный лес, плотность 0.075 trees/m^2 , частота 150 МГц) и результаты ее аппроксимации.

оказывается наиболее близко к логарифмическому представлению функции β/R^2 . Здесь α и β — некоторые коэффициенты в аппроксимирующих выражениях.

Рис. 2 относится к измерениям, выполненным в более густом из хвойных лесов на частоте 150 МГц. На приведенной зависимости также можно выделить два характерных участка, описываемых аналогичными функциями, с той разницей, что смена поведения дистанционной зависимости происходит на расстояниях порядка 90–100 м.

На рис. 3 изображены результаты экспериментов, выполненных в смешанном лесу на частоте 600 МГц. На рис. 4 — в редком хвойном лесу на частоте 150 МГц. В отличие от двух предыдущих результатов поведение данных зависимостей на всей дистанции проведения измерений не менялось и, как следует из рисунков, хорошо аппроксимировалось комбинацией экспоненциальной и степенной функций.

2. Обсуждение результатов

Полученные данные позволяют, на наш взгляд, сделать ряд выводов о взаимодействии электромагнитного излучения с лесной растительностью.

Во-первых, из анализа результатов на рис. 1 и 2 следует вывод о появлении боковой волны в этих лесах уже на дистанциях порядка 100 м. На это указывает сам факт изменения поведения дистанционных зависимостей на этих расстояниях, предполагающий смену механизмов распространения волн, а также вид функций, аппроксимирующих вторые участки полученных кривых. Отметим, что в большинстве работ, касающихся вопросов распространения боковых волн в лесу, даются существенно большие оценки подобных дистанций. Кроме того, данные рисунки демонстрируют прямую связь между плотностью растительности (в рассматриваемых случаях — древостоя) и моментом, когда боковые волны выявляются на фоне волн прямого прохождения. Следует подчеркнуть, что речь идет именно об

их проявлении, а не формировании, т.е. о дистанциях, на которых их ослабление становится сравнимо с ослаблением прямых волн. Указанная связь становится очевидно, если рассматривать распространение волн в лесу как в слое несовершенного диэлектрика. При этом уплотнение растительности эквивалентно увеличению эффективного показателя преломления „лесослоя“, что в свою очередь приводит к уменьшению зависящего от него угла полного внутреннего отражения, а следовательно, к сокращению расстояния, проходимого боковой волной внутри леса.

Во-вторых, зависимости, изображенные на рис. 3 и 4, не меняют своего поведения на всей протяженности исследовавшихся участков леса. Это означает, что механизм рассеяния и поглощения прямых волн, определяющий поведение начальных участков зависимостей на рис. 1 и 2, здесь является основным и, по-видимому, единственным на всей протяженности трассы. Если для измерений, выполненных на 600 МГц, этот результат был предвиден, поскольку средний интервал между деревьями и разброс их высот, определяющий неравномерность верхней границы леса, значительно превосходили длину волны излучения, то отсутствие боковой волны в хвойном лесу на частоте 150 МГц явилось достаточно неожиданным. Предположение о том, что для формирования и проявления боковой волны была недостаточна протяженность трассы измерений, в данном случае также, по-видимому, следует считать безосновательным, поскольку сравнительный анализ данных на рис. 1–2 с учетом плотности лесов позволял ожидать изменения характера зависимости уже на дистанции 130–150 м. Таким образом, можно сделать вывод, что обязательным условием формирования боковой волны является не превышение (по крайней мере значительное) средним расстоянием между деревьями рабочей длины волны. В противном случае лесной покров нельзя рассматривать как сплошную слоистую структуру. Обобщая сказанное, следует заключить, что боковая волна способна формироваться в лесу, биометрические характеристики которого и внутренняя структура позволяют использовать для описания электромагнитных процессов в нем модель сплошного слоя. И наоборот, модель слоистой структуры применима для описания лесного покрова до тех пор, пока он способен поддерживать распространение боковых волн.

Предложенная интерпретация представленных зависимостей хорошо согласуется и с результатами статистического анализа полученных данных. На рис. 5 и 6 приведены зависимости дисперсии измеренных уровней поля $D(B) = \langle B^2 \rangle - \langle B \rangle^2$, где символ $\langle \rangle$ означает усреднение по ансамблю реализаций, от пространственного разнеса антенн. Обработывались данные, средние значения которых изображены соответственно на рис. 3 и 4. График на рис. 5 демонстрирует наличие значительных флуктуаций уровня поля на всей трассе проведения измерений при отсутствии боковой волны. Это вполне

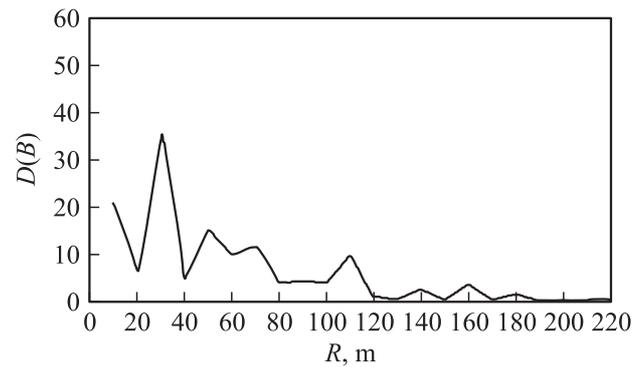


Рис. 5. Дисперсия результатов измерений в редком хвойном лесу.

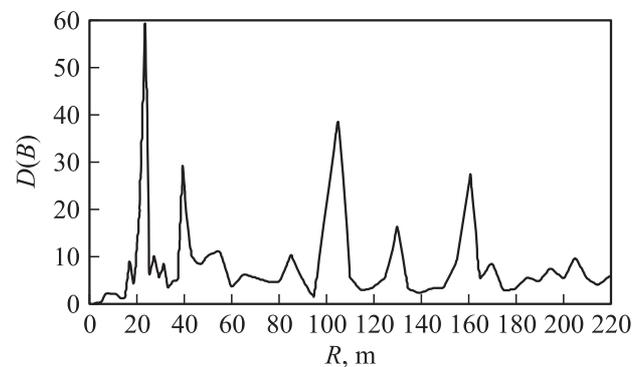


Рис. 6. Дисперсия результатов измерений в частом хвойном лесу.

объяснимо, поскольку многолучевой характер поля прямого прохождения приводит к существенному изменению фазовых соотношений волн, формирующихся в процессе многоратного рассеяния первичного излучения на деревьях, даже при незначительном пространственном перемещении приемной антенны. С другой стороны, появление боковой волны должно обуславливать преимущественно однолучевой характер распространения излучения на протяженных дистанциях, определяющий низкие значения дисперсии измеряемой величины, что и наблюдалось в экспериментах (рис. 6).

Отметим, что в значительной части публикаций, посвященных изучению ослабляющего действия лесной растительности, его оценка дается путем определения погонного ослабления, непосредственно связанного, как указывалось выше, с коэффициентом экстинкции (параметр α в первой из аппроксимирующих функций на рис. 1 и 2). Представленные данные указывают на то, что по крайней мере в VHF-диапазоне этот подход может привести к ошибочным результатам, если речь идет об оценке ослабления при наземном расположении антенн, не учитывающей возможные смены механизмов распространения волн. Степенная зависимость поля от расстояния, характерная для боковой волны, обуславливает неизменность наклона дистанционных зависимостей

относительно осей на соответствующих графиках, т.е. постоянство скорости затухания поля с расстоянием для любого леса. В данном случае погонное ослабление как параметр, характеризующий ослабляющие свойства какого-либо вида растительности, теряет смысл.

Заключение

Таким образом, в настоящей работе представлены результаты экспериментальных исследований распространения волн VHF–UHF-диапазонов в лесных покровах земной поверхности. Доказано, что в VHF-диапазоне уже на небольших дистанциях между погруженными в лесную среду антеннами возможно возникновение боковых волн. Формирование такого типа волновых процессов определяется частотой излучения и биометрическими параметрами растительности. Наличие боковых волн делает некорректным подход к описанию ослабляющих свойств леса через понятие погонного ослабления.

Авторы выражают признательность Е.Б. Атутову и Б.В. Басанову за помощь в проведении экспериментов.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (проекты № 12-02-98010).

Список литературы

- [1] Чухланцев А.А., Шутко А.М., Головачев С.П. // Радиотехника и электроника. 2003. Т. 48. № 11. С. 1285–1311.
- [2] Wait J.R. *Electromagnetic Waves in Stratified Media*. N.Y.: Pergamon Press, 1962. P. 372.
- [3] Tamir T. // IEEE Trans. Antennas and Propagation. 1967. Vol. 15. N 6. P. 806–817.
- [4] Wang F., Sarabandi K. // IEEE Trans. Antennas and Propagation. 2005. Vol. 53. N 7. P. 2138–2145.
- [5] Гранков А.Г., Мильшин А.А., Чухланцев А.А. // Исследование земли из космоса. 2005. № 1. С. 1–7.
- [6] Акутов Е.Б., Ломухин Ю.Л. // Радиотехника и электроника. 2007. Т. 52. № 11. С. 1360–1365.
- [7] Gervasio P.S., Cavalcante, Attilio J., Giarola // IEEE Trans. Antennas and Propagation. 1983. Vol. AP-31. N 1. P. 141–145.
- [8] Li Y., Ling H. // Progress in Electromagnetics Research. 2009. Vol. 91. P. 17–34.
- [9] Meng Y.S., Lee Y.H., Ng B.C. // IEEE Trans. Antennas and Propagation. 2009. Vol. 57. N 5. P. 1461–1468.
- [10] Якубов В.П., Тельпуховский Е.Д., Цепелев Г.М., Мионов В.Л., Кашкин В.Б. // Журнал радиоэлектроники. 2002. № 10. <http://jre.cplire.ru/alt/oct02/2/text.html>.