

Оценка эмпирических моделей распространения радиоволн в лесных массивах сантиметрового и миллиметрового диапазонов

А.В. Тихомиров¹, В.Ю. Михайлов¹, Е.В. Омелянчук¹, А.Ю. Семенова¹, М.А. Рожкова²

¹ *Национальный исследовательский университет «МИЭТ»,*

² *ЗАО «КРОК инкорпорейтед»*

Аннотация: Данная статья посвящена вопросам распространения радиоволн в условиях лесных массивов. Рассмотрен вопрос представления лесного массива как гетерогенной структуры с малой диэлектрической проницаемостью. Авторами проведен расчет и сравнение ослабления радиосигнала по нескольким эмпирическим моделям. Показано, что эмпирические модели учитывают гетерогенную структуру лесного массива при переходе радиоволн из свободного пространства в лесной массив.

Ключевые слова: распространение радиоволн, лесные массивы, эмпирическая модель, затухание радиосигнала, наземная подвижная связь, электродинамические характеристики гетерогенной структуры.

Введение

Для решения задач в области радиосвязи одним из важнейших является вопрос оценки затухания сигнала при распространении радиоволн на выбранном участке местности, где располагается абонент сети радиосвязи. Существует множество моделей, описывающих данный процесс и позволяющих определить степень затухания и искажения сигнала для различных типов местности, а также влияние климатических условий. К сожалению, в настоящее время отсутствует четко сформулированная теория и универсальная математическая модель, которая описывала бы влияние различных видов растительности в разных климатических зонах на распространение электромагнитных волн.

Лесной покров является крайне сложным типом растительной среды с точки зрения моделирования распространения радиоволн в связи с его неоднородностью и различной плотностью. Поэтому данный вопрос остается актуальным с момента начала исследований в данной области в 1960-х годах [1] и до сегодняшнего дня, когда большинство абонентов находятся в городах, где особое внимание с точки зрения благоустройства и сохранения экосистемы города уделяется лесным массивам и паркам [2]. Одним из подходов к его решению является представление лесного массива в качестве поглощающего диэлектрического слоя, ограниченного землей снизу и воздухом сверху.

Данная работа посвящена оценке учета электродинамических свойств лесного массива в эмпирических моделях при расчете ослабления сигнала сантиметрового и

миллиметрового диапазона для современных и перспективных систем подвижной радиосвязи.

Анализ электродинамических свойств растительности различных типов

Леса на обширной территории Российской Федерации характеризуются различным составом, плотностью и хозяйственным назначением [3,4]. Каждая из частей дерева (ствол и крона с листьями) имеет свои значения электродинамических параметров, различающиеся в зависимости от породы дерева и климатических условий, а также времени года. Далее будем рассматривать лесной массив в целом в качестве проводящей среды, поэтому акцентировать внимание на отдельных деревьях и их параметрах не имеет смысла. Важной характеристикой всего лесного массива является плотность насаждения (или количество деревьев на 1 м^2), которая напрямую влияет на степень искажения, преломления, отражения и поглощения сигнала внутри данной природной среды.

Очевидно, что чем ниже плотность насаждения, тем меньше электродинамические параметры лесного массива, как среды, отличаются от этих же параметров воздуха. Соответственно, нижняя граница диапазонов значений диэлектрической проницаемости ϵ , магнитной проницаемости μ и удельной проводимости σ будет соизмерима со значениями этих параметров для воздуха, а именно ($\epsilon = 1,00058$, $\mu = 1,000038$, $\sigma = 10\text{-}15 \text{ См/м}$).

Автор работы [5] по моделированию распространения радиоволн в лесной среде привел рассчитанные значения её диэлектрической проницаемости с использованием обратного метода из источника [6]. Ориентируясь на диапазоны частот для сетей пятого поколения мобильной связи FR1 (450 МГц – 6000 МГц) и FR2 (24250 МГц – 52600 МГц) [7], значения $\epsilon = 1,040$, $\sigma = 0,160 \text{ мСм/м}$ из источника [5] можно использовать в качестве нижней границы диапазонов значений диэлектрической проницаемости и удельной проводимости для лесного массива. Данные значения являются минимальными [1, 5-6, 8-11], которые приводятся в научно-технической литературе. Верхней границей диапазона для диэлектрической проницаемости можно считать значение, полученное экспериментально авторами статьи [9] для Истоминского леса вблизи оз. Байкал ($\epsilon = 1,6$), как максимальное по итогам аналитического исследования доступных источников. Значение удельной проводимости лесного массива примерно одинаково во всех источниках и изменяется в небольшом диапазоне $\sigma = 0,1 - 0,2 \text{ мСм/м}$ [1, 5-6, 8-11].

Значение магнитной проницаемости μ лесного массива, как полупроводящей среды, будем считать равным 1 (как для воздуха или дерева), по причине того, что данный параметр имеет смысл только для проводящих сред, например, металла.

Если лесной массив представить в качестве некоторой полупроводящей материальной среды с набором соответствующих электродинамических параметров, можно смоделировать распространение сигнала в данной среде при помощи следствий из уравнений Максвелла (или теории электромагнитного поля).

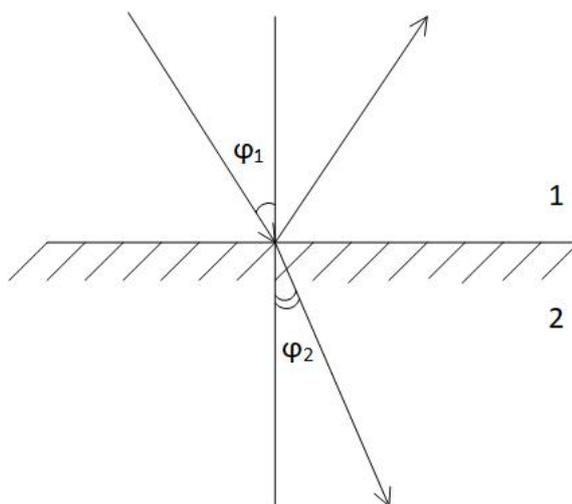


Рисунок 1 – Падение радиоволны на границу раздела воздух - лесной массив

На рис. 1 схематически изображено преломление и отражение сигнала при его падении на границу раздела двух сред (из менее плотной 1 в более плотную 2). Первая среда представляет собой воздух, передатчик находится в ней. Вторая среда с большей плотностью является лесным массивом. При падении электромагнитной волны на границу раздела этих двух сред возникают две волны: отраженная, далее распространяющаяся в среде 1, и преломленная – распространяющаяся в среде 2.

Согласно закону преломления Снеллиуса и закону отражения отношение синуса угла падения к синусу угла отражения для данных сред есть величина постоянная [12]:

$$\frac{\sin \varphi_1}{\sin \varphi_2} = \sqrt{\frac{\varepsilon_2 \mu_2}{\varepsilon_1 \mu_1}} = \frac{n_2}{n_1} = n_{12}$$

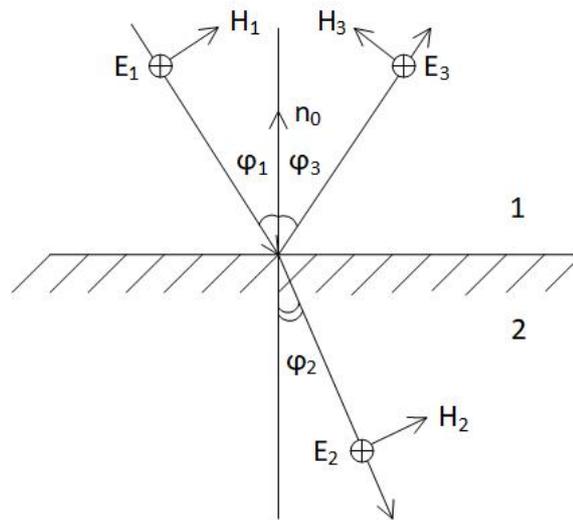


Рисунок 2 – Падение горизонтально поляризованной электромагнитной волны на границу раздела воздух - лесной массив

Для горизонтально поляризованной электромагнитной волны (рис. 2), у которой вектор напряженности E перпендикулярен плоскости падения, можно определить значения напряженности для отраженной и преломленной волны.

$$E_{2\perp} = f_{\perp} \cdot E_{1\perp},$$

$$E_{3\perp} = F_{\perp} \cdot E_{1\perp},$$

где f_{\perp} и F_{\perp} – коэффициенты Френеля для горизонтально поляризованных волн (далее коэффициент преломления и коэффициент отражения, соответственно).

Для случая, когда первая среда – воздух ($\epsilon_1 = 1$), а вторая среда имеет большую диэлектрическую проницаемость ($\epsilon_2 > 1$), то при наклонном падении [12]:

$$f_{\perp} = \frac{2 \cos \varphi_1}{\cos \varphi_1 + \sqrt{\epsilon_2 - \sin^2 \varphi_1}} \quad (1)$$

$$F_{\perp} = \frac{\cos \varphi_1 - \sqrt{\epsilon_2 - \sin^2 \varphi_1}}{\cos \varphi_1 + \sqrt{\epsilon_2 - \sin^2 \varphi_1}} \quad (2)$$

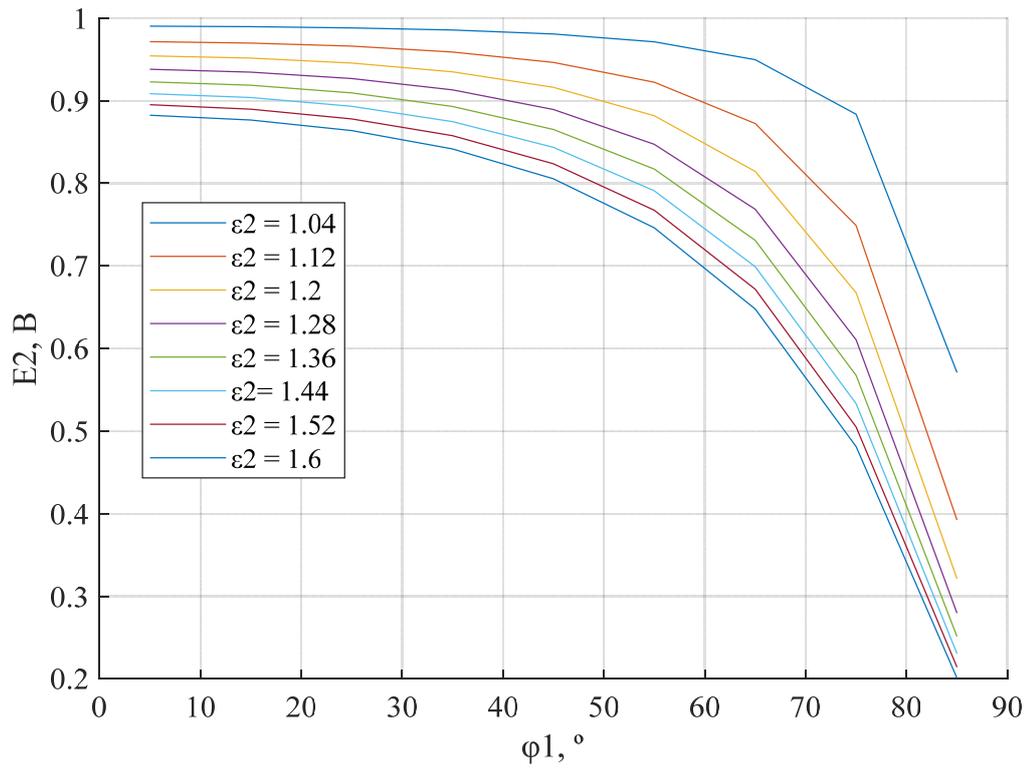


Рисунок 3 – Зависимость напряженности преломленной волны от угла падения

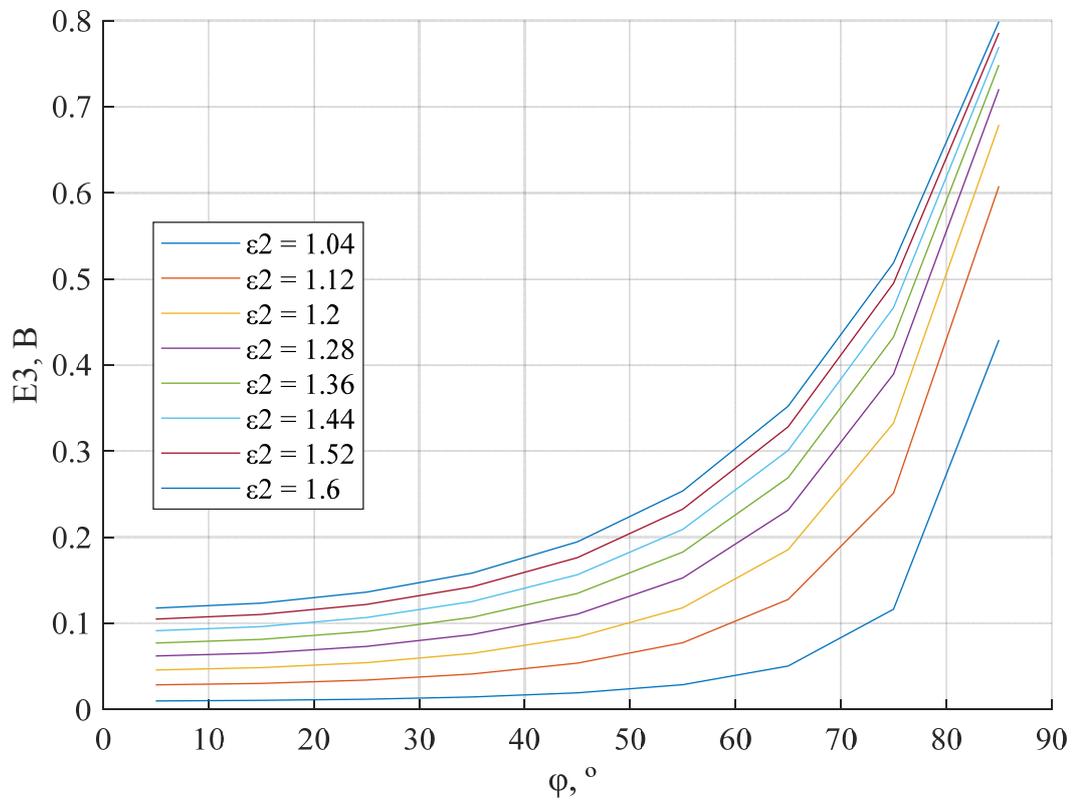


Рисунок 4 – Зависимость напряженности отраженной волны от угла падения

Как видно из рисунков 3 и 4, лесной массив из-за относительно малой диэлектрической проницаемости при углах падения до 60° не оказывает значительное влияние на сигнал. Однако при углах падения больше 60° усиливается эффект отражения, что приводит к эффекту боковой волны, которая огибает лесной массив.

Рассмотрим обратный случай, когда электромагнитная волна падает на границу раздела лесного массива и воздуха со стороны более плотной среды.

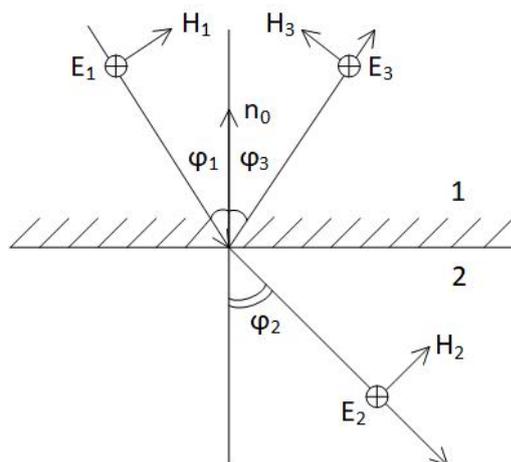


Рисунок 5 - Падение горизонтально поляризованной электромагнитной волны на границу раздела лесной массив – воздух

Тогда коэффициенты преломления и отражения вычисляются по формулам (1) и (2) [12]:

$$f_{\perp} = \frac{2 \cos \varphi_1}{\cos \varphi_1 + \sqrt{\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} - \sin^2 \varphi_1}},$$

$$F_{\perp} = \frac{\cos \varphi_1 - \sqrt{\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} - \sin^2 \varphi_1}}{\cos \varphi_1 + \sqrt{\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} - \sin^2 \varphi_1}},$$

где ε_1 – диэлектрическая проницаемость лесного массива, ε_2 – диэлектрическая проницаемость воздуха.

В данном случае важно учесть, что для каждого значения ε_1 найдется некоторое критическое значение угла φ_1 (8), при котором коэффициенты преломления и отражения станут комплексными величинами.

$$\varphi_{кр} = \arcsin \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_1}}$$

Напряженности преломленной и отраженной волны равны:

$$E_{02} = f_{\perp} \cdot E_{01}$$

$$E_{03} = F_{\perp} \cdot E_{01}$$

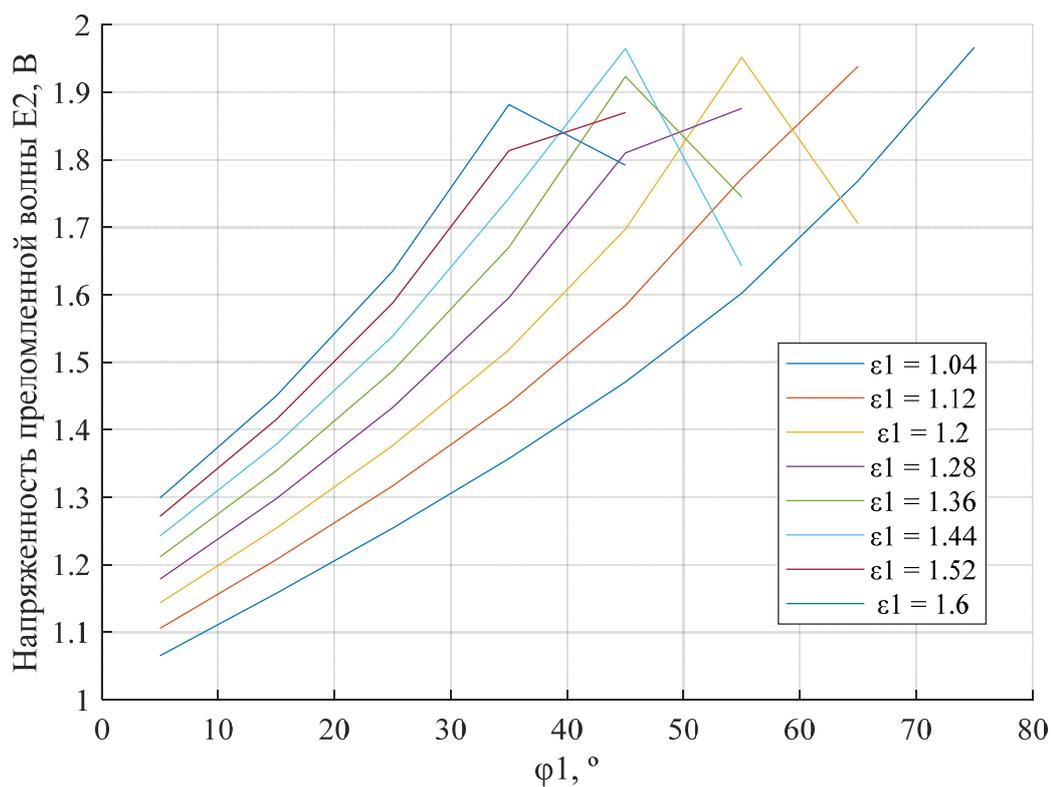


Рисунок 6 – Зависимость напряженности преломленной волны от угла падения на границу раздела двух сред (лесной массив-воздух)

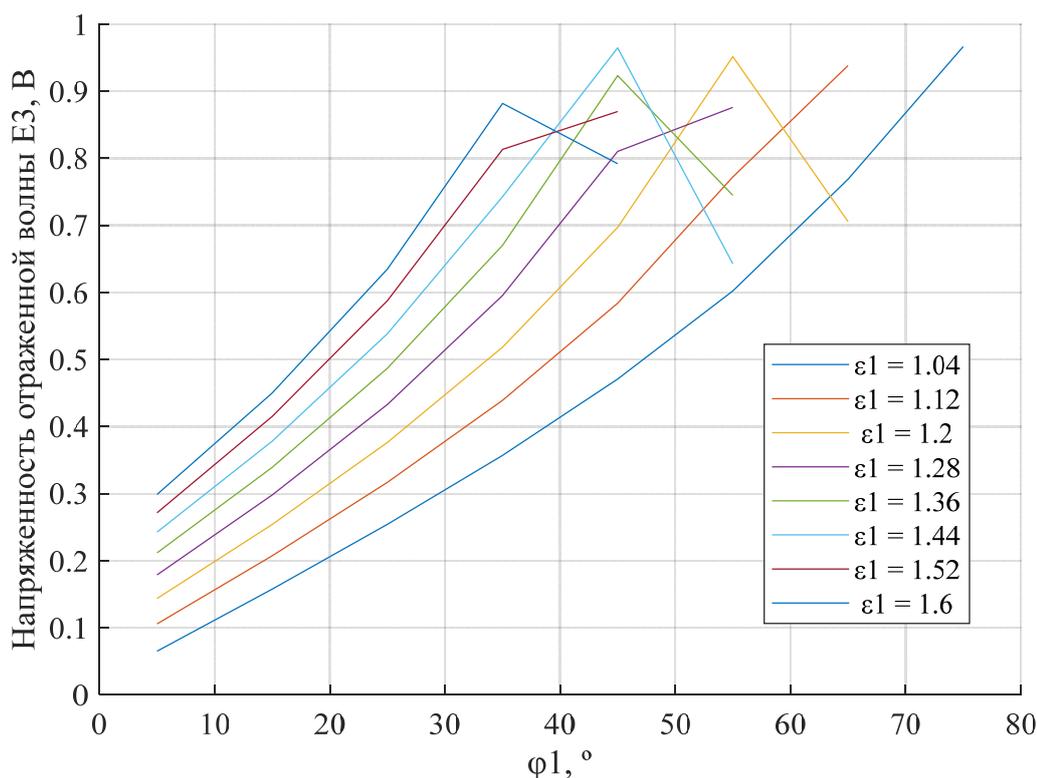


Рисунок 7 – Зависимость напряженности отраженной волны от угла падения на границу раздела двух сред (лесной массив-воздух)

На рисунках 6 и 7 для диэлектрической проницаемости 1,2 и выше наблюдается изменение градиента напряженности при углах на 10-15° меньше, чем критический угол. Например, критический угол для лесного массива с диэлектрической проницаемостью 1,6 составляет примерно 50°, а изменение напряженности начинается с 35°. Аналогично для лесного массива с диэлектрической проницаемостью 1,2: критический угол - 65°, угол изменения градиента напряженности - 55°.

Виды математических моделей распространения радиоволн в лесном массиве

Для оценки влияния лесных массивов на распространение радиоволн принято использовать различные виды математических моделей распространения радиоволн, которые в той или иной степени учитывают электродинамические свойства растительности различных типов, а также другие факторы, влияющие на распространение в условиях неоднородной растительности.

Как отмечается в [13], при распространении радиоволн в условиях неоднородной растительности происходят следующие явления:

- затухание в стволах, ветвях и листьях;
- рассеивание на стволах, ветвях и листьях
- отражения от лесной подстилки и от границ раздела двух сред с разной диэлектрической проницаемостью «лесной массив – воздух»
- дифракция на краях элементов растительности и на вершинах лесного полога;
- изменение поляризации;
- возникновение боковой волны;
- отражение от лесного массива.

Таким образом, поле в точке приема есть суперпозиция нескольких составляющих: прямая радиоволна; радиоволна, рассеянная на элементах лесного массива; радиоволна, подвергнутая дифракции на элементах растительности; отраженные радиоволны от границ раздела сред и лесной подстилки.

На текущий момент существует 6 типов математических моделей распространения радиоволн [13]:

- детерминированные,
- статистические,
- полудетерминированные,
- полустатистические,
- полуэмпирические,
- эмпирические.

Под детерминированными моделями подразумевают модели, основанные на уравнении Максвелла, которые определяют основные составляющие электромагнитного поля в месте приема.

Примерами таких моделей служат модель на основе метода параболического уравнения [14], метода Geometrical Theory of Diffraction [15], метода Uniform Theory Diffraction [16] и другие. Сложность этих моделей заключается в трудоемкости вычислений и необходимости представления радиоволны как монохроматической, что не соответствует действительности.

Статистические модели используют различные статистические приближения относительного одного или нескольких элементов лесного массива (подстилка, деревья, листва и т.д.). Существует большое количество таких статистических моделей, одна из

которых, например, пренебрегает отличием электромагнитного поля в неоднородной среде [17], другая не учитывает взаимодействие между элементами внутри лесного массива при многократном рассеивании [18] и другие.

Полудетерминированные модели используют классические модели однолучевого и двухлучевого распространения, к которым добавляются слагаемые, учитывающие электрофизические особенности лесного массива.

Полустатистическая модель разбивает лесной массив на две зоны: малое расстояние и большое расстояние. В каждой из этих зон преобладает своя составляющая, которая описывает распространение внутри массива. Для малых расстояний это когерентная составляющая, а для больших – некогерентная.

Полуэмпирическая модель определяет распространение как сумму постоянного ослабления в свободном пространстве для однолучевого распространения и погонного ослабления, которое выражено градиентом затухания.

Эмпирические модели получены на основе экспериментальных исследований для конкретных диапазонов частот и типов лесных массивов. Они учитывают практически все факторы, которые влияют на распространение, так как потери определяются как разность между излучаемым и принимаемым сигналом, являющимся суперпозицией всех составляющих при распространении. Общая структура выражения для таких моделей сводится к степенной форме относительно частоты и расстояния, которая зависит от типа лесного массива [19-21].

На практике, сигнал на входе приемника представляет собой суперпозицию отраженных сигналов от всех элементов лесного массива, которая представляет собой шумовой сигнал. Детерминированные и статистические модели не могут учесть всех факторов, возникающих при распространении радиоволн в лесном массиве, поэтому для решения инженерных задач они наименее эффективны. Наилучшим решением при проектировании систем наземной подвижной связи является использование эмпирических моделей распространения радиоволн, математическое выражение для расчета потерь, полученное для одного лесного массива, которых можно экстраполировать на аналогичную по составу и плотности лесную растительность.

Расчет затухания радиоволн в лесных массивах по эмпирическим моделям

Модель Вайсбергера впервые была представлена на конференции в 1982 году [19]. Данная модель была получена эмпирическим путем. Вайсбергер рассматривал экспоненциальную модель потерь $L=0.26 f^{0.77} d_f$, но при малых расстояниях до 400 м обнаружил неточность данной модели в диапазоне от 230 МГц до 95 ГГц. Поэтому им была проведена серия экспериментов для разных частот поляризации и расстояний. По результатам экспериментов была выведена следующая формула:

$$L(dB) = \begin{cases} 1,33 * f^{0,284} d_f^{0,588} & 14 м < d_f \leq 400 м \\ 0,45 * f^{0,284} d_f & 0 м \leq d_f < 14 м \end{cases} \quad (8)$$

где d_f — расстояние внутри леса (м), f — частота сигнала (ГГц).

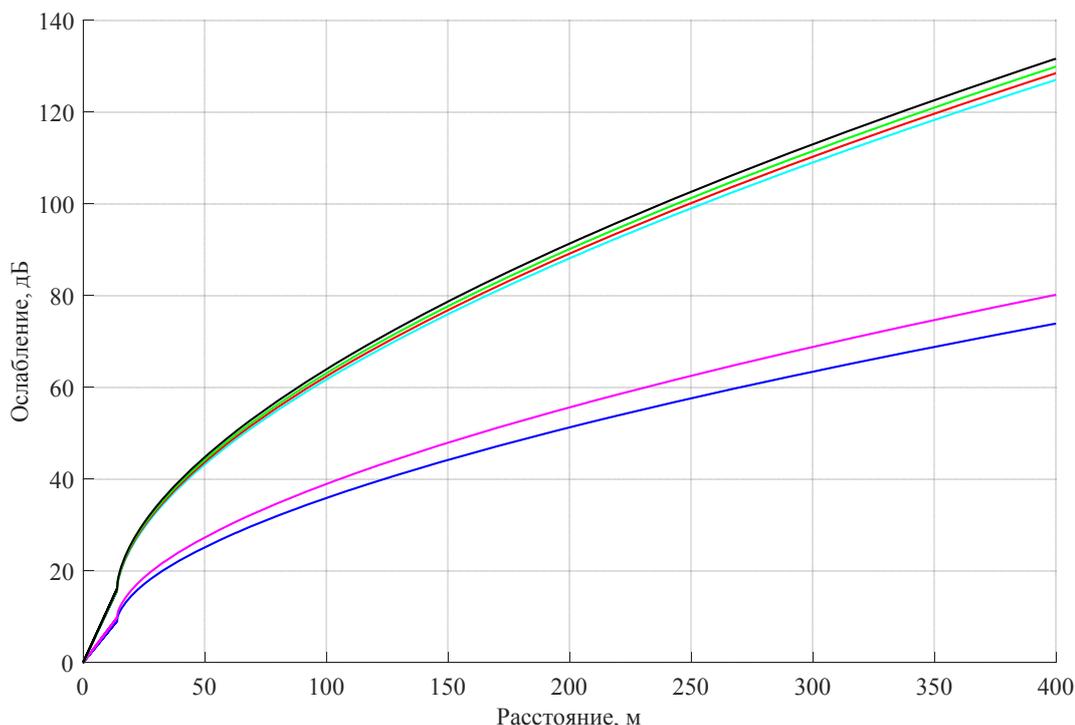


Рисунок 8 – График зависимости ослабления сигнала в лесном массиве от расстояния по модели Вайсбергера

На достаточно малых расстояниях (менее 1 метра) модель Вайсбергера (рис. 8) учитывает электродинамические свойства лесного массива за счет разделения модели на две составляющие по расстоянию до 14 метров и более. Такое разделение подтверждает тезис о диэлектрической природе лесного массива с малой диэлектрической проницаемостью ϵ .

Также можно считать, что из-за диэлектрической природы лесного массива влияние на затухание электромагнитного поля при малых расстояниях для различных частот до 30 ГГц отличается незначительно. При дальнейшем распространении электромагнитной волны в лесном массиве наблюдаются аналогичное распространению в свободном пространстве увеличение ослабления с увеличением частоты.

Вторая модель — это модель ITU. В рекомендации [20] приводится два варианта расчёта потерь в растительности. В данной модели дополнительные потери в лесном массиве описываются с помощью двух параметров:

- коэффициент погонного ослабления, выражающийся в дБ/м. Им обуславливается рассеяние энергии электромагнитных волн за пределами радиотрассы; его измерение можно проводить на очень коротких трассах;
- общее максимальное дополнительное ослабление радиосигнала в лесном массиве за счёт потерь в растительности, измеряющееся в дБ. Также при расчете этого параметра учитывается влияние других физических явлений, таких как распространение радиоволн над лесным массивом и рассеивание в пределах лесного массива.

Первый вариант представляет собой дополнительное ослабление сигнала за счет прохождения радиоволны через растительность. Данное ослабление выражается формулой:

$$A_{ev} = A_m [1 - \exp(-d\gamma / A_m)] \quad (9)$$

где d — расстояние от кромки леса (м), γ — погонное ослабление в растительности (дБ/м), A_m — максимальное ослабление при определенном типе и дальности распространения в растительности (дБ).

Величина погонного ослабления, γ (дБ/м), обусловленного растительностью, зависит от типа и от плотности растительности.

Второй вариант — это наиболее часто встречающаяся в публикациях модель. Она представляет собой экспоненциальную формулу вида:

$$L(dB) = Af^B d^C (\theta + E)^G \quad (10)$$

где f — частота (МГц), d — глубина леса (м), θ — угол места (градусы). Коэффициенты A , B , C , E и G определяются эмпирически.

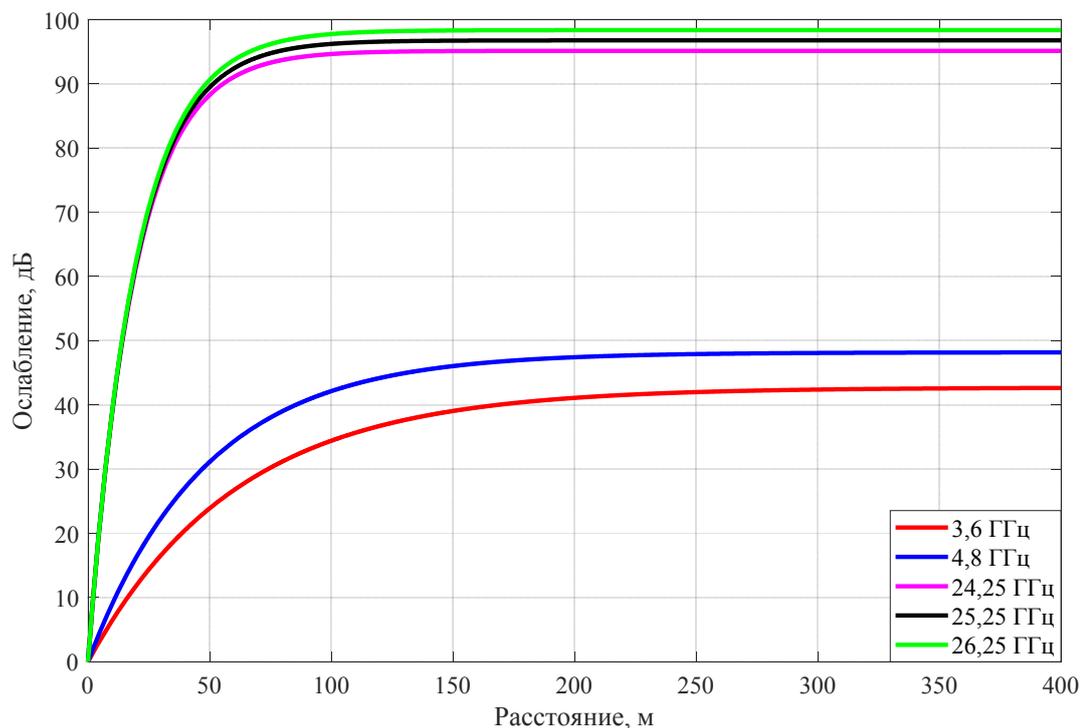


Рисунок 9 – График зависимости ослабления сигнала в лесном массиве от расстояния согласно рекомендации ITU

По результатам вычисления ослабления по модели ITU (рис. 9) наблюдается незначительное изменение затухания в растительности, начиная со 100 метров для миллиметрового и с 200 метров для сантиметрового диапазонов частот. Таким образом, основным фактором, который ослабляет электромагнитное поле на расстояниях, значительно превышающих длину волны, является затухание в свободном пространстве. Однако данная модель также подтверждает электродинамические свойства лесного массива, так как при малых расстояниях внутри леса наблюдается резкое ослабление сигнала, что соответствует переходу волны из менее плотной среды ($\epsilon=1$) в среду с большим значением ϵ .

Модель COST-235 была получена группой европейских ученых на основе экспериментов [21]. Она рассчитывает ослабление в лесном массиве в зависимости от наличия или отсутствия в нём лиственного покрова. Эта модель имеет вид:

$$L(dB) = \begin{cases} 26,6 * f^{-0,2} d^{0,5} & \text{out - of - leaf} \\ 15,6 * f^{-0,009} d^{0,26} & \text{in - leaf} \end{cases} \quad (11)$$

Модель COST-235 была специально рассчитана для математической оценки распространения радиоволн миллиметрового диапазона в лесном массиве.

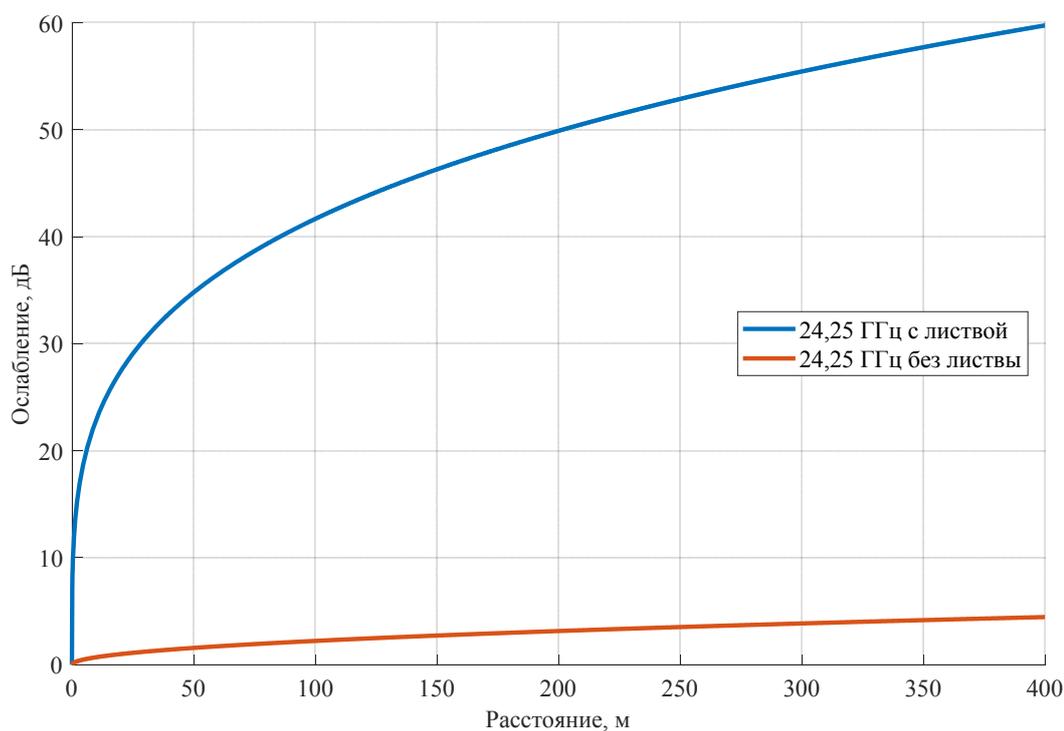


Рисунок 10 – График зависимости ослабления сигнала в лесном массиве от расстояния по модели COST-235

Расчет по модели COST-235 (рис. 10) показал, что основную долю потерь составляет переотражения и поглощение из-за крон деревьев и мелкого подлеска. Данная модель доказывает, что основной вклад в диэлектрическую природу вносит крона деревьев и мелкая растительность (подлесок). Однако данную модель необходимо рассматривать как дополнительные потери, так как потери в свободном пространстве на расстоянии 400 метров превышают 111 дБ, что практически в два раза больше значения полученного при расчете.

Выводы

Лесной массив с точки зрения распространения радиоволн представляет собой гетерогенную структуру с малым значением диэлектрической проницаемости. При углах падения больше 85° существует вероятность полного отражения от границы раздела «воздух-лесной массив».

С инженерной точки зрения для оценки бюджета радиолинии удобнее всего использовать эмпирические модели. При этом рассмотренные в статье модели имеют на малых расстояниях характерную величину ослабления, которые соответствуют при



переходе из менее плотной в более диэлектрически плотную среду. Гетерогенность лесного массива проявляется в логарифмической зависимости ослабления радиоволн, так как на границах разделов сред наблюдается наибольшее затухание, в то время как при расстояниях значительно больших длины волны влияние лесного массива уменьшается.

По результатам расчета затухания электромагнитного поля для сетей подвижной связи, в том числе пятого поколения, выявляется необходимость увеличения плотности базовых станций, так как ослабление в лесном массиве для сантиметровых и миллиметровых диапазонов значительно и является дополнительным к основным потерям при распространении.

Для подтверждения учета эмпирическими моделями электродинамических характеристик лесного массива требуется проведение эксперимента для лесных массивов с различной диэлектрической проницаемостью.

Литература

1. Meng Y. S., Lee Y. H., and Ng B. C. Study of propagation loss prediction in forest environment.// Progress in Electromagn. Res. B, vol. 17, pp. 117–133, 2009.
2. Ткаченко С.Б. Москва – неосуществленный город-сад в плане «Новой Москвы» // Architecture and Modern Information Technologies. – 2019. – № 2(47). – с. 232-250. – URL: marhi.ru/AMIT/2019/2kvart19/PDF/15_tkachenko.pdf
3. Лесное хозяйство России // URL: geographyofrussia.com/lesnoe-hozyajstvo-rossii/
4. Леса России // URL: geographyofrussia.com/les-rossii/
5. Ng, Yeow Chong Daniel. Modeling of radiowave propagation in a forested environment. 2014, p. 15.
6. Tewari R. K., Swarup S., and Roy M. N. Evaluation of relative permittivity and conductivity of forest slab from experimentally measured data on lateral wave attenuation constant.// Int. J. of Electron., vol. 61, no. 5, pp. 597–605, 1986.
7. 3GPP Technical Specifications 38.101, V15.6.0 « User Equipment (UE) radio transmission and reception; Part 1: Range 1 Standalone», 2019. URL: portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3283
8. Mauro S. Assis. Comments on Some Radio Wave Propagation Mechanisms in the Amazon Region // Progress In Electromagnetics Research Symposium Proceedings, KL, MALAYSIA, pp. 265-269, 2012



9. Балханов В.К., Адвокатов В.Р., Башкуев Ю.Б. Усредненные электрические характеристики «лесо-слоя» и высота лесного покрова // Журнал технической физики, 2014, Т. 84, № 8. с. 132-136.
 10. Tamir T. On radio wave propagation in forest environments // IEEE Trans. Antennas and Propag., Vol. 15, No. 6, pp. 806-817, 1967
 11. Gervásio P.S. Cavalcante; Mário A. R. Sanches and Rômulo A. N. Oliveira. Mobile radio propagation along mixed paths in forest environment // Journal of Microwaves and Optoelectronics, Vol. 1, No. 4, pp. 42-52, 1999.
 12. Барыбин А. А. и др., под ред. Куликовского А. А., Кривицкого Б. Х., Дулина В. Н. Справочник по теоретическим основам радиоэлектроники в двух томах: Том 1. М.: Энергия, 1977. 504 с.
 13. Попов В.И. Распространение радиоволн в лесах. М.: Горячая линия, 2015. 392 с.
 14. Mias C., Constantinou C.C. Modeling of plane wave transmission through a periodic array of cylinders with the parabolic equation method // Microwave and Optical Technology Letters, pp. 78-84, 1998.
 15. James G.L. Geometrical Theory of Diffraction for Electromagnetic Waves. Peter Peregrinus Ltd., London, UK, 1986. 293 p.
 16. Shukla A.K., Seville A., Ndzi D., Richter J., Eden D. Description of a Generic Vegetation Attenuation Model for 1-60 GHz. 1st International Workshop: “Propagation Impairment Mitigation for Millimeter Wave Radio System”, COST Action 280, pp. 1-10, July 2002.
 17. Blankenship G.L. Stochastic Modeling of EM Scattering From Foliage. Rep. RADC-TR-89 22, Rome Air Development Center, Hanscom, AFB, MA, p.0632, March 1989. AD A213118.
 18. Kurum Mehment, O’Neill Peggy. Backscatter Measurements over Vegetation by Ground-Based Microwave Radars. NASA Goddard Space Flight Center, Hydrological Sciences Branch, Code 614.3, Greenbelt, Maryland 20771, USA, pp. 1-4.
 19. Weissberger M.A., «An Initial Critical Summary of Models for Predicting the Attenuation of Radio Waves by Trees», ESD-TR-81-101, Electromagnet Compat. Analysis Center, Annapolis, MD, 162 p, July 1982.
 20. Recommendation ITU-R P.833 Attenuation in vegetation. URL: itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.833-9-201609-I!!PDF-E.pdf
-



21. ICT COST Action 235. Radiowave propagation effects on next-generation fixed-services terrestrial telecommunication systems. Chair: M.P.M. Hall, UK URL: cost.eu/COST_Actions/ict/235

References

1. Meng Y. S., Lee Y. H. and Ng B. C. Progress in Electromagn. Res. B, vol. 17, pp. 117–133, 2009
2. Tkachenko S.B. Architecture and Modern Information Technologies, 2019, no. 2(47), pp. 232-250. URL: marhi.ru/AMIT/2019/2kvart19/PDF/15_tkachenko.pdf
3. Lesnoe khozyajstvo Rossii [Forestry of Russia]. URL: geographyofrussia.com/lesnoe-xozyajstvo-rossii/
4. Lesa Rossii [Forests of Russia]. URL: geographyofrussia.com/les-rossii/
5. Ng, Yeow Chong Daniel. Modeling of radiowave propagation in a forested environment. p. 15, 2014
6. Tewari R. K., Swarup S., and Roy M. N.. Int. J. of Electron., vol. 61, no. 5, pp. 597–605, 1986.
7. 3GPP Technical Specifications 38.101, V15.6.0 « User Equipment (UE) radio transmission and reception; Part 1: Range 1 Standalone», 2019. URL: portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3283
8. Mauro S. Assis. Progress In Electromagnetics Research Symposium Proceedings, KL, MALAYSIA, pp. 265-269, 2012
9. Balxanov, V.K., Advokatov, V.R., Bashkuev, Yu.B. Zhurnal texnicheskoj fiziki, 2014, Volume 84, № 8, pp. 132-136, 2013.
10. Tamir T. IEEE Trans. Antennas and Propag., Vol. 15, № 6, pp. 806-817, 1967.
11. Gervásio P. S. Cavalcante; Mário A. R. Sanches and Rômulo A. N. Oliveira. Journal of Microwaves and Optoelectronics, Vol. 1, No. 4, pp. 42-52, 1999.
12. Bary`bin A. A., i dr.; red. Kulikovskij A. A.; red. Kriviczkij B.X., Dulin V. N. Spravochnik po teoreticheskim osnovam radioelektroniki [Reference on the theoretical foundations of radio electronics:]: V 2 t. T.1.: E`nergiya, 2014, 1977. 504 p.
13. Popov V.I. Rasprostranenie radiovoln v lesax [Radio wave propagation in forests]: Goryachaya liniya, 2015, 392 p.
14. Mias C., Constantinou C.C. Microwave and Optical Technology Letters, pp. 78-84, 1998.



15. James G.L. Geometrical Theory of Diffraction for Electromagnetic Waves. Peter Peregrinus Ltd., London, UK, 1986. 293 p.
16. Shukla A.K., Seville A., Ndzi D., Richter J., Eden D. 1st International Workshop: “Propagation Impairment Mitigation for Millimeter Wave Radio System”, COST Action 280, pp. 1-10, July 2002.
17. Blankenship G.L. Stochastic Modeling of EM Scattering From Foliage. Rep. RADC-TR-89 22, Rome Air Development Center, Hanscom, AFB, MA, March 1989. AD A213118, 632 p.
18. Kurum Mehment, O’Neill Peggy. Backscatter Measurements over Vegetation by Ground-Based Microwave Radars. NASA Goddard Space Flight Center, Hydrological Sciences Branch, Code 614.3, Greenbelt, Maryland 20771, USA, pp. 1-4.
19. Weissberger, M.A., «An Initial Critical Summary of Models for Predicting the Attenuation of Radio Waves by Trees», ESD-TR-81-101, Electromagnet Compat. Analysis Center, Annapolis, MD, July 1982, 162 p.
20. Recommendation ITU-R P.833 Attenuation in vegetation. URL: itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.833-9-201609-I!!PDF-E.pdf
21. ICT COST Action 235. Radiowave propagation effects on next-generation fixed-services terrestrial telecommunication systems. Chair: M.P.M. Hall, UK URL: cost.eu/COST_Actions/ict/235