

Физика волновых процессов и радиотехнические системы

УДК 537.87:621.394.94

Анализ напряженности электромагнитного поля за пологом леса

Е.А. Багдасарян, В.А. Тимофеев

Исследовано влияние, оказываемое лесным слоем на распространение радиоволн. Рассмотрена модель, позволяющая проводить расчет напряженности поля в случае затенения, создаваемого лесом для высоко поднятого передатчика. Проведен сравнительный анализ вклада дифракционной и прошедшей компонент, формирующих поле в точке приема. Выполнено сопоставление результатов расчетов с экспериментальными данными для частоты 464 МГц.

В связи с широким внедрением мобильных, а также других наземных систем связи необходима информация о влиянии условий распространения на их функционирование в реальных ситуациях. На практике очень часто имеет место взаимодействие излучения с растительностью подстилающей поверхности (лесной участок, высокие заросли кустов и др.). Поэтому проблема изучения влияния растительной среды на формирование поля в точке приема является актуальной и практически значимой. При проектировании радиосистем для оценки их работоспособности и обеспечения электромагнитной совместимости с другими радиосредствами наибольший интерес представляет моделирование взаимодействия излучения с лесной средой. В настоящее время существуют эмпирические и теоретические модели. В первых из них используют экспериментально полученные регрессионные зависимости между геофизическими и биофизическими параметрами и электромагнитными характеристиками сред. Недостатком данного подхода является его ограниченная применимость, поскольку зачастую эти зависимости могут быть использованы лишь в пределах тестового региона, где они были получены. Модели второго типа основываются на электродинамическом анализе взаимодействия излучения с элементами растительности.

В связи с органической структурой лесной среды она может проявлять рассеивающие, прелом-

ляющие, поглощающие и другие свойства, которые в значительной степени зависят от частоты распространяющейся электромагнитной волны. Это обстоятельство порождает ряд подходов, используемых при моделировании. Лес может быть состоящим из верхнего слоя листьев и веток, среднего слоя стволов деревьев, а также слоя подстилающей поверхности и воздушного пространства над кронами. Для длин волн, превышающих по величине элементы растительности, слой крон и слой стволов может быть однородной средой, характеризуемой эффективными значениями диэлектрической ϵ и магнитной проницаемости μ . Модели, основывающиеся на этом приближении, можно найти в работах [1,2]. Для более высоких частот (т.е. длин волн, соизмеримых с линейными размерами растительности) данное представление некорректно. Поэтому в таких ситуациях может быть использована модель однородного слоя со случайным распределением центров неоднородностей диэлектрической проницаемости и привлечением аппарата функций Грина [3]. Другой метод заключается в анализе растительной среды как структуры, состоящей из расположенных случайным образом в пространстве тонких дисков и цилиндров, имеющих электродинамические параметры ϵ , μ . Результирующее поле может быть получено в результате статистического усреднения рассеяния на этих элементах [4]. К сожалению, последние две модели отличаются большой неопределенностью исходных параметров и соответственно получаемых результатов, а также сложностью вычислений, и поэтому не применяются на практике. Разнообразие вариантов расположения

Е.А. Багдасарян, В.А. Тимофеев

г. Ярославль, Ярославский государственный университет им. П. Г. Демидова

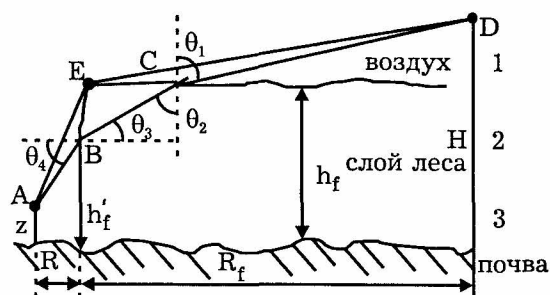


Рис. 1

приемника и передатчика относительно местности и леса приводит к необходимости решения отдельных задач по определению напряженности поля в точке приема для каждой конкретной ситуации. В работе представлена двухкомпонентная модель, позволяющая определить уровень сигнала при наличии затенения, создаваемого лесным массивом.

Рассмотрим довольно часто встречающийся на практике случай, при котором лесной полог закрывает прямую видимость между высоко поднятой относительно вершин деревьев антенной передатчика и мобильным приемником, как это изображено на рис. 1. В данной ситуации поле в точке приема будет результатом сложения волны, образованной дифракцией на кромке леса (лучи DE и EA), и волны, прошедшей сквозь лесной полог. Отсутствие на рис. 1 других лучей, проходящих сквозь лесной слой, а также луча, отраженного от подстилающей поверхности, объясняется большим ослаблением, испытываемым волной, распространяющейся на существенно более протяженные расстояния в таких средах, о чем можно судить на основании работы [2].

С практической точки зрения представляет интерес оценка соотношения вклада дифракционной и прошедшей лесной слой составляющих с удалением от границы леса. Для расчета напряженности поля в точке приема необходимо учесть влияние, оказываемое на нее преломлением на границах перехода лес — воздух (точки B, C), а также поглощение в среде лесного массива. Для математического моделирования такой ситуации в диапазоне до ~ 1 ГГц растительную среду можно приближенно представить как достаточно однородную и обладающую характеристиками ϵ, μ , постоянными внутри слоя.

Исходя из вышесказанного, поле (среднеквадратичное значение) в точке приема может быть представлено следующим образом:

$$E_A = \sqrt{E_p^2 + E_d^2}, \quad (1)$$

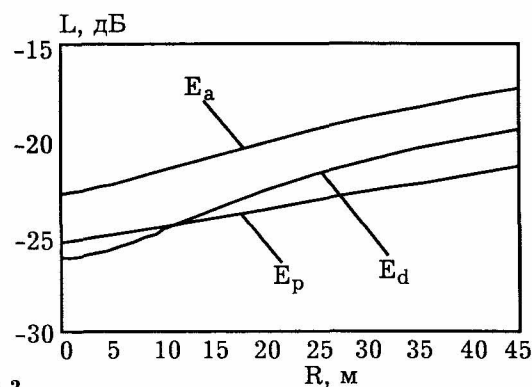


Рис. 2

где E_d — поле, образованное в результате дифракции волны на кромке леса; E_p — поле, формируемое волной прошедшей сквозь лес. Дифракционная составляющая E_d может быть найдена известными методами, например [5]. Прошедшая через лесной слой компонента E_p определяется в соответствии с геометрией задачи следующим соотношением:

$$E_p = \frac{\sqrt{60 \cdot P \cdot G \cdot F(\theta, \varphi)} \cdot K_C \cdot K_B \cdot K_a \times}{(r_{BC} + r_{AB} + r_{CD})} \times \exp\{i \cdot k \cdot (n' \cdot r_{BC} + r_{AB} + r_{CD})\}, \quad (2)$$

где P — мощность передатчика; G и $F(\theta, \varphi)$ — коэффициент усиления и нормированная диаграмма направленности передающей антенны; k — волновое число в свободном пространстве; $n = n' + i \cdot n''$ — комплексный показатель преломления слоя леса. Коэффициенты K_C, K_B определяют преломление волны в точках B и C на границе раздела лес — воздух. Поскольку углы θ_1 и θ_2 (см. рис. 1), а также θ_3 и θ_4 связаны соотношением Снеллиуса, эти коэффициенты могут быть представлены в виде:

$$K_C = \begin{cases} \frac{2 \cdot n \cdot \cos \theta_1}{n^2 \cdot \cos \theta_1 + \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_1}}, & \text{для вертикальной поляризации} \\ \frac{2 \cdot \cos \theta_1}{\cos \theta_1 + \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_1}}, & \text{для горизонтальной поляризации,} \end{cases} \quad (3)$$

$$K_B = \begin{cases} \frac{2 \cdot n \cdot \sin \theta_1}{\sin \theta_1 + n^2 \cdot \sqrt{1 - n^2 + \sin^2 \theta_1}}, & \text{для вертикальной поляризации} \\ \frac{2 \cdot \sin \theta_1}{\sin \theta_1 + \sqrt{1 - n^2 + \sin^2 \theta_1}}, & \text{для горизонтальной поляризации.} \end{cases} \quad (4)$$

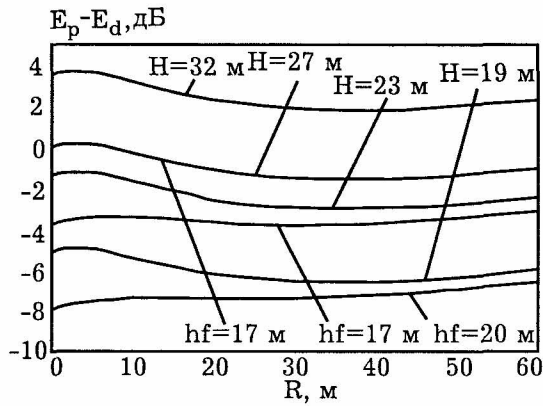


Рис. 3

Волна при таком распространении проходит два участка: ВС — в лесной среде, АВ и CD — в воздухе. Тогда оптическая длина пути, пройденная волной E_p , определится как

$$\begin{aligned} & k \cdot (n' \cdot r_{BC} + r_{AB} + r_{CD}) = \\ & k \cdot [n' \cdot (h_f - h'_f) \cdot \sec \theta_2 + \\ & + r + \sqrt{(h_f - z)^2 + R^2} - \\ & - (h_f - h'_f) \cdot \tan \theta_2 \cdot \sin \theta_1] = \\ & = k \cdot [r + \sqrt{(h_f - z)^2 + R^2} + \\ & + \sqrt{n'^2 - \sin^2 \theta_1} \cdot (h_f - h'_f)], \end{aligned} \quad (5)$$

где h_f — средняя высота лесного слоя; h'_f — высота точки В, находящейся на границе раздела леса; R_f — протяженность лесного массива; R — расстояние до границы с лесным массивом; H — высота подъема передающей антенны; z — высота точки приема; r — расстояние CD.

Поскольку коэффициент преломления $n = n' + i \cdot n''$ имеет комплексную форму, в которой составляющая n'' выражает поглощающие свойства слоя леса, то множителем K_a в выражении (2) учтено поглощение, испытываемое волной в растительной среде. Для рассматриваемой ситуации его можно представить в следующем виде:

$$\begin{aligned} K_a &= \exp(-r_{BC} \cdot n'' \cdot k) = \\ &= \exp \left(- \frac{(h_f - h'_f) \cdot n'}{\sqrt{n'^2 - \sin^2 \theta_1}} \cdot n'' \cdot k \right). \end{aligned} \quad (6)$$

Учитывая тот факт, что лесной массив имеет достаточную неоднородность видового состава леса, влияние величины n'' может быть рассчитано как заданной в определенном диапазоне.

Численный анализ влияния леса на распространение излучения был выполнен в метровом и

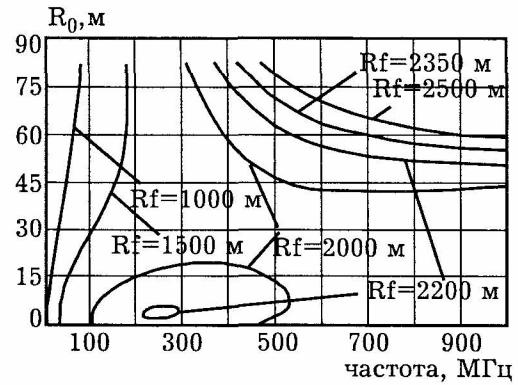


Рис. 4

дециметровом диапазонах радиоволн при различных параметрах задачи (высоте h_f и протяженности R_f лесного массива, высоте подъема антенны передатчика H) для случая вертикальной поляризации. Высота точки приема (высота подъема антенны мобильного носителя) предполагалась постоянной $z = 1.5$ м. Дифракционная компонента E_d определялась на основе [5], а проходящая составляющая E_p — по формуле (2). Мнимая часть показателя преломления находилась из [6] через значение погонного коэффициента ослабления γ (дБ/м)

$$n'' = 5.49 \cdot \gamma / f, \quad (7)$$

где f — частота излучения (в МГц).

На рис. 2 представлены результаты расчетов ослабления $L(\partial B) = 20 \cdot \lg |E| / |E_0|$ относительно поля свободного пространства E_0 для случая изотропного излучателя в зависимости от расстояния R между границей леса и точкой приема. Приведенные данные получены при следующих значениях параметров: $R_f = 2000$ м, $h_f = 12$ м, $H = 30$ м, $f = 3000$ МГц. Представленные кривые показывают, что в зависимости от местоположения точки приема относительно лесного массива вклад компонент в результирующее поле будет различен. На близких расстояниях основное поле формируется волной, проходящей сквозь полог леса, при некотором удалении наблюдается доминирующее влияние дифракционной составляющей. Как показали результаты численного анализа, в зависимости от конкретных параметров задачи эти эффекты имеют место при различном расположении точки приема относительно лесного массива. Кроме того, может наблюдаться и попеременное преобладание составляющих поля, а точек пересечения кривых E_d и E_p будет больше, чем одна (это изображено на рис. 2).

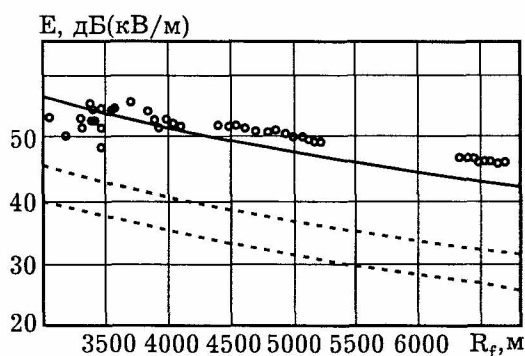


Рис. 5

Одними из основных параметров, определяющих соотношение прошедшей и дифракционной компонент поля E_p и E_d , является высота подъема передающей антенны H и средняя высота деревьев h_f . На рис. 3 представлено распределение разности $(E_p - E_d)$ при удалении от границы леса для частоты $f = 3000 \text{ МГц}$. Данные зависимости были получены для $H = 19 \text{ м}$, 23 , 27 и 32 м при неизменной высоте лесного слоя 12 м , а также для $h_f = 12 \text{ м}$, 17 и 20 м и постоянной высоте $H = 27 \text{ м}$. Анализ представленных графиков показывает, что увеличение высоты подъема передающей антенны приводит к увеличению уровня E_p , а рост высоты и увеличение протяженности леса — к его уменьшению. В первом случае это явление объясняется тем, что волна испытывает меньшее ослабление в лесном массиве вследствие сокращения расстояния, проходимого сквозь слой растительности, а также уменьшением величины коэффициента K_B на границе перехода лес — воздух из-за увеличения угла скольжения волны. Обратный эффект имеет место при возрастании высоты деревьев и увеличении протяженности леса.

Был выполнен частотный анализ зависимости расстояния до лесного массива R_0 , при котором вклад дифракционной и прошедшей компонент одинаков, в диапазоне частот от 30 до 1000 МГц . На рис. 4 представлены графики R_0 , полученные при разных протяженностях леса $R_f = 1000 \text{ м}$, 1500 , 2000 , 2200 , 2350 и 2500 м , $h_f = 16 \text{ м}$, $H = 35 \text{ м}$. Из рисунка видно, что при R_f , равном 1000 и 1500 м имеется одно значение R_0 (одна точка пересечения $E_d(R)$ и $E_p(R)$), которое увеличивается с возрастанием частоты. Для данного случая будет наблюдаться преобладание сначала E_p , а затем E_d компоненты поля. При параметрах $R_f = 2000 \text{ м}$, 2200 м искомых точек образуется несколько, с попеременным доминированием E_p и E_d для разных участков. Это связано с существенно нели-

нейным характером изменения дифракционного поля. С увеличением протяженности до $R_f = 2350$ и 2500 метров также наблюдается единичное пересечение кривых, но уже сначала преобладающей будет E_d компонента, а после — E_p . Данная точка с увеличением частоты будет приближаться к границе лесного массива. Приведенные данные свидетельствуют о необходимости учета обоих компонент при расчете напряженности поля за лесной полосой.

С целью проверки компонент теоретической модели было поведено сопоставление результатов расчетов с экспериментальными данными. Измерения были выполнены в весенний период для частоты $f = 463.9 \text{ МГц}$ системы сотовой связи стандарта NMT. Высота подвеса передающей антенны относительно земли была $H = 38 \text{ м}$, приемной — $z = 1.5 \text{ м}$. Коэффициент усиления передающей коллинеарной антенны составлял 5 дБ , а приемной — 0.5 дБ относительно полуволнового вибратора. Поляризация излучения вертикальная. Прием сигнала осуществлялся в точках, расположенных с небольшим углублением в лесной массив для предотвращения влияния дифракционной составляющей. Лес, выбранный для экспериментальных исследований, состоял как из лиственных, так и хвойных пород деревьев. Средняя высота деревьев была около 17 м . Измерения проводились для 41 точки на основании 10 выборок с последующим усреднением по времени и месту в каждой. Для нахождения коэффициента поглощения лесного слоя K_d использовались, как и ранее при теоретическом анализе, данные из [6], а также результаты, полученные в [7] с доверительным интервалом значений для ослабления в лесном слое.

На рис. 5 представлены результаты экспериментальных исследований, а также расчетные зависимости напряженности поля в лесном массиве в зависимости от удаления от передатчика. Результаты сопоставления показывают, что данные натурных измерений лучше согласуются с результатами моделирования (сплошная кривая), полученными на основе зависимостей, приведенных в [6]. Расхождение с расчетами (пунктирные кривые), выполненными с использованием данных из [7], связано, по-видимому, с пространственной неоднородностью структуры леса при измерениях, а также с недостаточной статистикой данных.

В целом результаты работы показали, что лесная среда оказывает существенное влияние

на распространение радиоволн. Приведенная двухкомпонентная модель позволяет определить напряженность поля за лесным пологом. Как показал анализ результатов моделирования, доминирующее влияние дифракции на кромке лесного массива имеет место в случаях, когда точка приема расположена на значительном удалении от края леса. Преобладающий вклад проходящей сквозь лесной полог волны наблюдается вблизи и внутри лесного массива. Сопоставление с экспериментальными данными показало достаточно хорошее согласие с используемой моделью. Проведенные исследования свидетельствуют о необходимости учета обоих компонент поля для оценки влияния леса при проектировании систем радиосвязи различного назначения.

Литература

1. Tamir T. Radio waves propagation along mixed paths in forest environments // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. — 1977. — Vol. AP-25. — № 4. — P. 471-477.
2. Магазинникова А.Л., Якубов В.П. Дуальный механизм распространения радиоволн в условиях леса // Радиотехника и электроника. — 1999. — Т. 44. — № 1. — С. 5-9.
3. Чухланцев А.А., Шутко А.М., Головачев С.П. Ослабление электромагнитных волн лесными покровами // Радиотехника и электроника. — 2003. — Т. 48. — № 11. — С.1285-1311.
4. Torricco S.A., Bertoni H.L. Modeling tree effects on path loss in a residential environment // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. — 1998. — Vol. AP-46. — № 6. — P. 872-880.
5. Recommendation ITU-R P.526-5. Propagation by diffraction.
6. Recommendation ITU-R P.833-4. Attenuation in vegetation.
7. Доржиев Б.Ч., Хомяк Е.М. Результаты экспериментальных исследований распространения радиоволн в лесах умеренной зоны // Электросвязь. — 1997. — № 8. — С. 23-24.

Electromagnetic Field Analysis behind Forest Medium

E.A.Bagdasaryan, V.A. Timofeev

The effect of forest layer on radiowave propagation has been investigated. The model permitted the calculation of electromagnetic field value for the transmitting antenna located above the forest medium was presented. A comparative analysis of the contribution of the diffracted and refracted field components at the point of reception has been carried out. The agreement of calculation results and experimental data at frequency 464 MHz has been executed.

Тимофеев Владимир Авенирович, 1955 года рождения, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры радиофизики Ярославского государственного университета им. П.Г. Демидова. Окончил Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова в 1978 году. Защитил диссертацию в 1990 г. в Нижегородском государственном университете. Автор более 70 научных работ. Область научных интересов: теория электромагнитного поля, взаимодействие электромагнитного излучения с различными естественными и искусственными объектами, распространение радиоволн в случайно-неоднородных средах.

Багдасарян Евгений Арменович, 1981 года рождения. Окончил Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова по специальности «Радиофизика и электроника» в 2003 г. Аспирант кафедры радиофизики. Область научных интересов — взаимодействие электромагнитного излучения с растительными средами.