

РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН В ЛЕСУ

О.В. Левкулич, Л.А. Пантеев
freemanpla2005@gmail.com

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет
имени Г.Ф. Морозова»

Аннотация. В данной работе был проведен анализ распространения радиоволн (далее РРВ) в лесных массивах, представляющих интерес для решения задач радиосвязи, локации, навигации и дистанционного зондирования. Лесные экосистемы обладают уникальными физическими свойствами, которые существенно влияют на характеристики радиосигналов, такие как затухание, отражение и преломление. В ходе исследования были изучены электрофизические параметры лесных массивов, что позволяет лучше понять механизмы взаимодействия радиоволн с лесным покровом.

Ключевые слова: РРВ, сигнал, электрофизические параметры.

RADIO WAVE PROPAGATION IN THE FOREST

O.V. Levkulich, L.A. Pantileev
freemanpla2005@gmail.com

Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov

Abstract. In this paper we analyzed radio wave propagation (hereinafter referred to as RF propagation) in forests, which are of interest for solving problems of radio communication, location, navigation and remote sensing. Forest ecosystems have unique physical properties that significantly affect the characteristics of radio signals such as attenuation, reflection and refraction. This study investigated the electrophysical parameters of forests, which provides a better understanding of the mechanisms of radio wave interaction with forest cover.

Keywords: RFW, signal, electrophysical parameters.

Введение

Проблема распространения радиоволн (далее РРВ) в лесных массивах является очень актуальной в разных областях науки и техники, например, в беспроводных системах связи, дистанционном зондировании, системах мобильной связи, радиорелейной связи, радиолокационных системах, и даже в космических системах связи. В этой статье, я хочу дать общие сведения о подобном типе РРВ и затронуть основные проблемы связи в лесном массиве.

При распространении электромагнитных волн в лесу возникает ряд особенностей, которые нужно учитывать инженерам при строительстве вышек или использовании радиотехники. Лесные экосистемы обладают сложной и

хаотичной структурой, состоящей из разнообразных препятствий — деревьев различной высоты, плотности и размещения. Это создает серьезные сложности в точном моделировании распространения электромагнитных волн, что делает задачу инженеров еще более многогранной и требующей детального анализа.

Основные факторы любого лесного массива:

1) Потери сигнала из-за поглощения и дифракции: радиоволны могут поглощаться лесом, что приводит к уменьшению уровня сигнала. Дифракция также может привести к отклонению сигнала от прямого направления распространения.

2) Множественное отражение и рассеяние: радиоволны могут отражаться от различных элементов леса, таких как деревья, лианы, ветви и листья, что создает множественные пути распространения и может вызвать интерференцию.

3) Затухание сигнала из-за препятствий: плотность лесного покрова может создавать значительные препятствия для распространения радиоволн, особенно на высоких частотах.

Некоторые из этих нежелательных эффектов можно привести к минимуму, так, например при построении вышек сотовой связи их высота составляет около 100 метров, что помогает сократить возможность потери связи. Другой пример — это радиолокационные системы низколетящих целей, для них важно, чтобы лесные объекты не попадали в главные лепестки диаграмм направленности антенн. И располагаются они соответственно.

Однако существуют и плюсы распространения радиоволн в лесных массивах. Один из них заключается в их естественной изоляции от внешних помех и шумов, что позволяет получать более чистый и качественный сигнал. Кроме того, леса могут служить естественным экраном, защищающим от воздействия вредных электромагнитных излучений, которые могут испортить работу системы.

Важность понимания принципов распространения радиоволн в лесных массивах заключается в том, что это позволяет эффективно планировать и оптимизировать работу радиосвязи и других беспроводных систем в таких условиях. Это особенно важно для связи в лесных районах, где необходимо обеспечить надежную передачу и прием данных для обеспечения безопасности, связи и обмена информацией.

Характеристики леса как среды распространения

Особенности построения системы РРВ в лесу будет зависеть от его типа. Необходимо учитывать рассеяние на каждой группе элементов дерева (листья, ветви, стволы), что требует знания электрофизических параметров лесных массивов, характерных признаков образующих лес древесных пород (хвойные, широколиственные, смешанные и т.д.).

Леса в России по преимуществу бореальные. Основные лесообразующие породы в лесном фонде РФ: лиственница, сосна, ель, кедр, дуб, бук, береза, осина. Они занимают более 90 процентов земель, покрытых лесом. Прочие древесные породы занимают менее 1 процента территории, остальная площадь

– кустарники. Причём хвойные леса занимают свыше 80 процентов лесопокрытой площади России. Отчасти это из-за того, что сосновые деревья идеально приспособлены к условиям открытого места: они быстро растут даже на самой бедной почве.

Сами же леса могут иметь следующие особенности:

- При произрастании деревьев на свободе ветви с листвой располагаются практически по всему стволу, создавая достаточно широкую и многолиственную структуру.

- При произрастании деревьев в лесах они имеют (как правило) прямые стволы, большие ветви, но меньшие диаметры стволов и ветвей, по сравнению с деревьями, растущими на свободе.

Однако нужно всегда держать в уме, что лес – это многослойная структура. Если бы мы могли посмотреть на модель лес в разрезе, то могли бы увидеть его основные слои:

- Лесная почва (Корни и грунтовые воды)
- Лесная подстилка (травы, мох, опавшие листья и т.п.)
- Подлесок
- Подрост
- II ярус (Например, кроны клёна и др.)
- I ярус (Например, кроны ясеня, дуба, сосны и т.д.)

Каждый из этих уровней делится по плотности насаждения и размеров, что затрудняет расчёт РРВ в них. Но точно можно сказать, что густота деревьев в лесном массиве зависит от его возраста, например, с возрастом лес редет, происходит естественное его изживание (Различное для разных пород). Также насаждения делятся на чистые и смешанные. Как понятно из названий – «чистые» состоят из деревьев одной породы (Другие не более 5%). «Смешанные» же насаждения состоят из самых разных видов деревьев.

Влияние лесных факторов на распространение радиоволн: математический подход.

Если подытожить, то площадь леса, возраст, породы деревьев, параметры его «ярусов» крайне важны при планировании радиоэлектронной системы. Для того чтобы получить более чёткие результаты мы можем обратиться к определённым формулам:

Можно подсчитать плотность для каждого вида деревьев по формуле

$$D = N/P,$$

где D — популяционная плотность,

N — число особей,

P — площадь.

Простая плотность деревьев (N): $N = (T / A) * 1000$, где

N– количество деревьев на гектар,

T – общее количество деревьев в лесном массиве,

A – площадь леса в гектарах.

Объёмная плотность деревьев (V): $V = (T / A)$, где

V – среднее количество деревьев на кубический метр в лесу.

A – площадь леса в гектарах.

Для определения среднего расстояния между деревьями выбирают типичный для данного леса участок площадью 10×10 м и подсчитывают количество деревьев на ней.

Среднее расстояние между деревьями определяют обычно по формуле

$$L = 10/\sqrt{n},$$

где L – среднее расстояние между деревьями (м)

n – кол-во деревьев на 100 м^2 .

В общем случае полнота и густота насаждений являются случайными величинами. Чем выше число деревьев на единице площади, т.е. чем выше густота насаждений, тем ближе плотности распределения вероятностей полноты и густоты насаждений.

$$W(S) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_0} \exp \left[-\frac{(S - S_m)^2}{2\sigma_0} \right]$$

Рисунок 1 – Формула плотности распределения вероятностей полноты и густоты

S – случайная величина проекции кроны произвольного дерева,

S_m – мат. Ожидание случайной проекции S кроны произвольного дерева,

σ_0 – дисперсия густоты насаждений.

Всё это крайне обобщенные и простые формулы размещения объектов лесных массивов в пространстве. Тут мы можем сделать вывод, что точного подсчёта сделать невозможно, т.к. для формул берется усредненное значение количества объектов на участок территории или же шанс появления этого объекта.

(О более точных способах вычисления этих параметров можно прочитать в книге В.И. Попова «Распространение радиоволн в лесах»; глава 1)

Электрофизические параметры лесных массивов

Теперь следует описать электрофизические параметры лесных массивов.

К таковым относят:

– эффективную комплексную диэлектрическую проницаемость лесного массива как многослойной случайной гетерогенной (неоднородной) среды, в которой элементы и их расположение в пространстве и во времени подвержены случайным изменениям, в результате чего электромагнитные волны, распространяющиеся в них, также могут претерпевать пространственно-временные флуктуации;

– эффективную комплексную диэлектрическую проницаемость деревьев как крупных элементов лесного массива;

– эффективную комплексную диэлектрическую проницаемость элементов деревьев: стволов, ветвей и листьев;

– эффективную комплексную диэлектрическую проницаемость подстилки лесного массива, как отражающей неоднородной среды и

участвующей в формировании результирующего электромагнитного поля в точке приема.

Обычно эффективная комплексная диэлектрическая проницаемость лесного массива выражают как функционал:

$$\dot{\epsilon}_m = \Psi\{\lambda, \dot{\epsilon}_F, f_F, h_F\},$$

Рисунок 2 – Функционал диэлектрической проницаемости

В случае же анизотропии (это различие макроскопических свойств среды в различных направлениях внутри неё) лесной среды, представляется в виде тензора:

$$\dot{\epsilon}(r) = \begin{pmatrix} \dot{\epsilon}_{xx} & \dot{\epsilon}_{xy} & \dot{\epsilon}_{xz} \\ \dot{\epsilon}_{yx} & \dot{\epsilon}_{yy} & \dot{\epsilon}_{yz} \\ \dot{\epsilon}_{zx} & \dot{\epsilon}_{zy} & \dot{\epsilon}_{zz} \end{pmatrix},$$

Рисунок 3 – Тензор при анизотропии лесной среды

Электрофизические параметры лесных массивов. Так как в общем случае лесные массивы являются гетерогенными средами со случайным расположением неодинаковых по формам, размерам и параметрам дисперсных «частиц» элементов лесной растительности, то при разработке математических моделей лесов используются различные приближения:

Например, в непрерывной модели лесные массивы представляются в виде сплошной квазиоднородной диэлектрической среды с потерями, которая характеризуется значением ее эффективной комплексной диэлектрической проницаемости (или её тензором).

Или же – при объемных концентрациях лесной растительности менее 1 % на основе теории малых возмущений используется модель случайной неоднородной среды со слабой флуктуацией эффективной комплексной диэлектрической проницаемости (например, приближение Рытова).

Однако самым простым и наглядным из приближений считаются уравнения Максвелла для лесных массивов, как сплошных гетерогенных диэлектрических сред. Суть подобных уравнений заключается в описании подобной среды, для этого уравнения Максвелла включают в себя: уравнение Гаусса для электрического поля, уравнение Гаусса для магнитного поля, уравнение Фарадея и уравнение Ампера. Уравнения Максвелла для гетерогенных диэлектрических сред включают в себя дополнительные сложности, по сравнению с уравнениями для однородных сред. Основные особенности уравнений Максвелла для лесных массивов включают:

– Наличие дополнительных слагаемых, учитывающих неоднородности среды. Эти слагаемые учитывают градиенты параметров среды, такие как диэлектрическая проницаемость, магнитная проницаемость и проводимость.

– Уравнения Максвелла в гетерогенных средах могут быть нелинейными из-за неоднородности параметров среды. Это может приводить к сложным взаимодействиям между электромагнитными полями и средой.

– В гетерогенных средах могут возникать эффекты многократного отражения и рассеяния, которые не учитываются в уравнениях Максвелла для однородных сред.

– Для описания распространения электромагнитных волн в гетерогенных средах может потребоваться использование численных методов, таких как метод конечных разностей или метод конечных элементов, из-за сложности уравнений и неоднородности параметров среды.

Также нужно учитывать, что электромагнитная волна монохроматическая, т.е. имеет постоянную частоту и амплитуду.

Существует множество способов расчёта параметров этого уравнения и их математических моделей. Главной проблемой в них становится опять же хаотичность и уникальность лесных массивов. Из-за чего приходится делать поправки и приближения для конкретных обстоятельств.

Вывод

В итоге хочется отметить, что тема РРВ в лесных массивах весьма обширна и сложна для простого обывателя или радиолюбителя. Как можно понять из всего написанного выше основной проблемой является неравномерность и уникальность лесов. Если в специально высаженной лесополосе из деревьев одного вида можно сделать конкретные выводы то, допустим, в заповедном лесу это сделать будет гораздо сложнее в виду неровностей ландшафта, разного расстояния между деревьями, меняющегося уровня влажности и присутствия различных видов деревьев с отличающимися характеристиками. Но основная проблема в этой области – это банальное отсутствие практики. Для разных типов частот и волн сделана масса математических моделей, формул и приближений, но большинство из них не проверялось экспериментально. Но на данный момент мы можем увидеть рост интереса к этой теме в научном сообществе, так в период с 2005 по 2015 года было опубликовано около 18 диссертаций в этой области. Также в связи с компьютеризацией и переходом в Информационную эпоху необходимо позаботиться о надёжной связи даже в самых труднодоступных районах, особенно когда от этого могут зависеть жизни людей.

Профессор В.И. Попов в своей книге «Распространение радиоволн в лесах» считает, что для развития данного направления требуется провести ряд важных исследований, которые помогут выстроить более практичные модели решения проблемы:

1) исследовать соотношение между когерентной и некогерентной составляющими электромагнитных волн, распространяющихся вдоль трассы, проходящей в лесной растительности;

2) исследовать, начиная с какой рабочей частоты и при каком расстоянии внутри леса начинает проявляться влияние боковой ЭМВ;

- 3) исследовать процессы резонанса рассеяния на элементах лесной растительности;
- 4) исследовать влияние лесной подстилки на ЭМВ как при сквозном распространении, так и при вертикальном и наклонном падении;
- 5) исследовать эффект усиления за счет вариаций высоты антенн и рабочей частоты (что очень важно для систем беспроводной связи);
- 6) исследовать процессы кроссполяризации при вариациях рабочей частоты и параметров лесных массивов;
- 7) исследовать влияние сезонного эффекта на условия распространения ЭМВ в лесах;
- 8) исследовать влияние метеоусловий (и в конечном случае влажности) на основные параметры, определяющие условия распространения радиоволн в лесу;
- 9) исследовать спектральные характеристики широкополосных радиосигналов, распространяющихся в лесной растительности (в цифровых системах передачи информации)

Список литературы

1. Попов В.И. Распространение радиоволн в лесах / В.И. Попов // Электрофизические свойства лесных массивов, Классификация лесов – 2020. – главы 1-3, 7. – С. 372-373.
2. Попов В.И. Евразийский Союз Ученых (ЕСУ) # 11 (20) / В.И. Попов // Труды Всероссийской научно-практической конференции «Транспорт-2008». – 2015. – Часть 3. Рост. – С. 108-110.
3. Кашин А.С., Крицкая Т.А., Петрова Н.А., Шилова И.В. Методы изучения ценопопуляций цветковых растений. – 2015 – С. 50.
4. Бакаев Д.Н., Стукало О.Г., Денисенко В.В., Скрыпников А.В., Савченко И.И., Зиновьева В.В. Информационный инструментарий проектного управления развитием промышленных предприятий // Моделирование систем и процессов. – 2022. – Т. 15, № 2. – С. 14-24.

References

1. Popov V.I. Propagation of radio waves in forests. / V.I. Popov // Electrophysical properties of forests, Classification of forests. – 2020. – Chapters 1-3, 7. – P. 372-373.
2. Popov V.I. Eurasian Union of Scientists (ESU) # 11 (20) / V.I. Popov // Proceedings of the All-Russian scientific and practical conference "Transport-2008". – 2015. – Part 3. Growth. – pp. 108-110.
3. Kashin A.S., Kritskaya T.A., Petrova N.A., Shilova I.V. Methods of studying the cenopopulations of flowering plants. – 2015. – p. 50.
4. Bakaev D.N., Stukalo O.G., Denisenko V.V., Skrypnikov A.V., Savchenko I.I., Zinovieva V.V. Informational toolkit of project management of industrial enterprises development // Modeling of systems and processes. – 2022. – Vol. 15, № 2. – P. 14-24.