

*Малевиц Е.С., Михайлов М.С, Пермяков В.А.
Национальный исследовательский университет «МЭИ»*

Оценка влияния лесных массивов на распространение радиоволн в условиях сложного рельефа местности

Предлагается методика расчета распространения радиоволн над земной поверхностью сложной формы с использованием метода параболического уравнения. Оценивается влияние формы лесного полога на распространение радиоволн в лесу. Исследуется механизм формирования боковой волны. Представлены результаты численного моделирования распространения радиоволн в лесных массивах для трехмерной модели пространства. Используемую методику можно применять при расчете санитарно-защитных зон и зон ограничения застройки, для оценки влияния вырубки или посадки лесных массивов вблизи крупных антенных систем, для определения уровня потерь в радиотехнических системах.

Ключевые слова: Распространение радиоволн; лесной массив; метод параболического уравнения; неровности земной поверхности, боковая волна, фазированная антенная решетка.

1. Введение

Проблема влияния окружающей среды на распространение радиоволн, включая радиосвязь и радиолокацию, остается актуальной в течение длительного времени, начиная с первых десятилетий прошлого века.

В докладе рассматривается распространение радиоволн с использованием метода параболического уравнения для двумерной и трехмерной пространственных моделей. Главными факторами, влияющими на распространение радиоволн, являются поверхность Земли, включая крупномасштабные шероховатости, и лес. Из-за сложности построения теоретических моделей распространения радиоволн в лесу была проведена значительная работа на экспериментальном определении ослабления радиоволн в лесу. Различные варианты расположения передающей и приемные антенны. Наиболее подробно параметрами были расположение обеих антенн внутри леса и расположение передающей антенны по лесу и приемной антенны в лесу. Аналогичные исследования проводимых в разных странах. Основное внимание уделяется распространению радиоволн за пределами городов, поскольку передача антенны большой мощности принимаются в территории, вывезенной из городов. Внедренная методология позволяет рассчитывать санитарно-защитные зоны и зоны ограничения строительства, планирования посадки или вырубки лесов для оценки распространения радиоволн.

2. Влияние формы лесного полога на распространение радиоволн.

Большое 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 любая антенна, расположенная как внутри/вне леса, так и над лесом. Чаще всего в качестве антенн рассматриваются элементарные вибраторы, вертикальные, горизонтальные, либо наклонные.

В 1967 г. Т. Tamir в своей работе [1] рассмотрел распространение радиоволн в лесу в частотном диапазоне от 1 до 100 МГц, где лес представлен в виде поглощающего слоя. Он объяснил распространение радиоволн над листвой явлением боковой волны. Впоследствии Dense и Tamir [2] провели теоретическое исследование распространения радиоволн в лесу в частотном диапазоне от 2 до 200 МГц. В первоначальных работах Tamir [1] передающая и приемная антенны располагались внутри леса, в более поздних работах [3] одна из антенн находилась вне лесного массива. В работе Tamir [3] акцент делается на распространение радиоволн вдоль трех границ раздела (наземная, лесная и воздушная). Считается, что «земная волна» в отсутствии растительности играет лишь второстепенную роль. Куда большее значение имеют волны, распространяющиеся вдоль границы раздела «лесной полог-воздух», они дают наибольший вклад в результирующее поле. На дальностях до 100 км влияние боковых волн сильнее, чем волн, отраженных от ионосферы.

Недавняя монография [4] дает обзор публикаций по этой проблеме. Из монографии [4] следует, что форма лесного покрова является важной характеристикой леса, влияющего на распространение радиоволн условия. Влияние формы лесного покрова было описано в нескольких работах Sarabandi и др. [5], [6], где был использован для расчета метод физической оптики.

В этом докладе распространение радиоволн в лесу рассчитывается с использованием метода параболического уравнения для двухмерной модели пространства, для описания леса используются эффективные диэлектрические проницаемости.

Геометрия препятствия в виде ограниченного лесного массива представлена на рисунке 1. Лесной массив описывается четырехслойной моделью с заданными эффективными диэлектрическими проницаемостями каждого из слоев. Для выделения слоя полога используется две модели, приведенные на рисунках 2 и 3, для лиственного леса синусоидальная форма, для хвойного леса клиновидная, возможно также использование гибридной формы для смешанного леса.

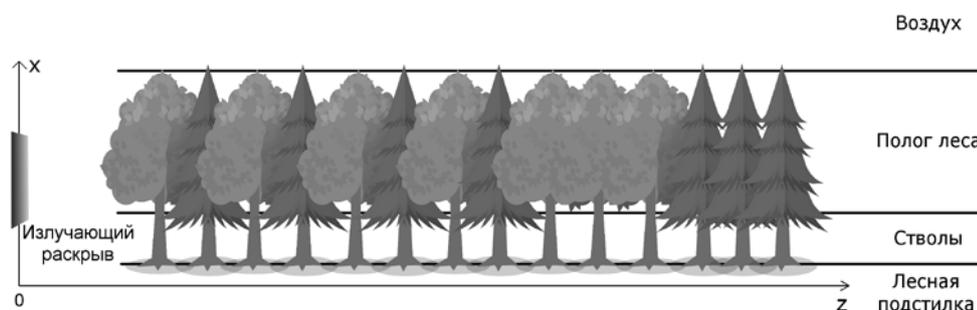


Рис. 1. Геометрия нерегулярности в виде лесного массива на поверхности Земли.

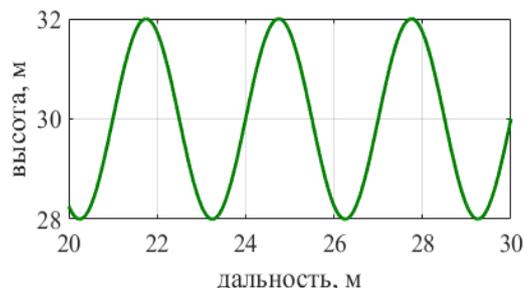


Рис. 2. Геометрия синусоидального полога для лиственного леса.

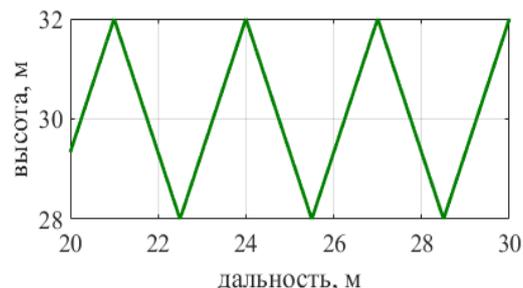


Рис. 3. Геометрия клиновидного полога для хвойного леса.

Источником сигнала в двухмерной модели пространства является одиночная антенна с заданной диаграммой направленности $\sin x/x$. Высота подъема передающей антенны над землей 8 м. Поляризация излучения вертикальная. Режим излучения непрерывный.

Численные результаты расчета поля методом параболического уравнения в двухмерной модели пространства представлены на рисунках 4–7. Начальное распределение поля было рассчитано в приближении метода геометрической оптики на расстоянии 20 м от антенны. Нижним граничным условием для параболического уравнения является подстилающая поверхность толщиной 20 м с заданной эффективной диэлектрической проницаемостью.

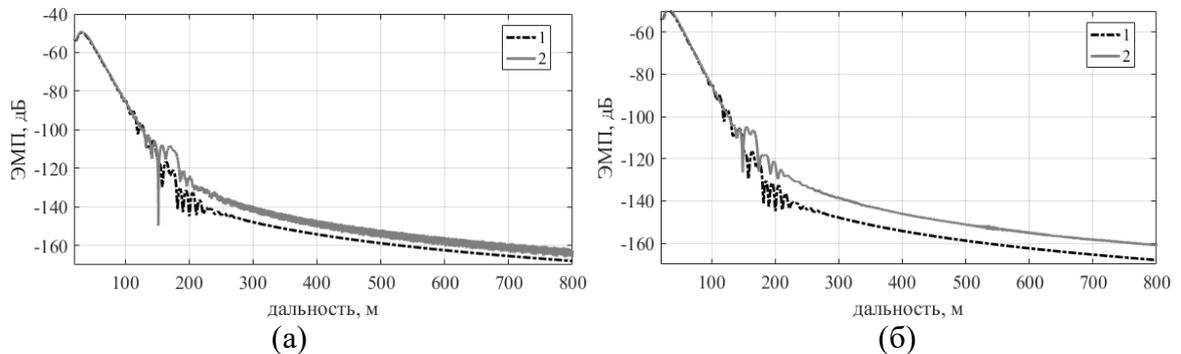


Рис. 4. Зависимость модуля напряженности поля от дальности на уровне 2 м над землей для лиственного леса средней высоты 20 м. Кривые 1–2 соответствуют: 1) плоский полог, 2) (а) – синусоидальный полог, (б) – клиновидный полог.

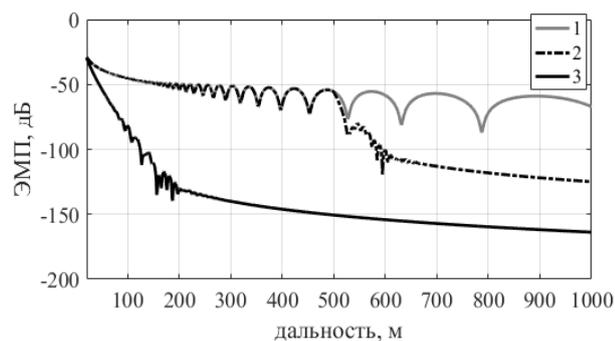


Рис. 5. Зависимость модуля напряженности поля от дальности на уровне 8 м над землей для трех случаев: 1) лес отсутствует, 2) лиственный лес начинается с 500 м от антенны, 3) лиственный лес начинается с 20 м от антенны.

Расчеты выполнялись для плоского, синусоидального и клиновидного пологов на высоте 2 и 8 м над земной поверхностью на частоте 600 МГц со средним расстоянием между деревьями 3 м. Эффективная диэлектрическая проницаемость полога леса $1,1-i0,009$, стволов $1,16-i0,024$, для подстилающей поверхности $4,1-i0,02$.

На рис.4 четко видно, что до дальности порядка 250 м распределение поля носит осциллирующий характер. Этот участок ослабления соответствует экспоненциальному затуханию по прямой линии связи между антенной и точкой приема в лесу, интерференция поля связана с отражением поля от подстилающей поверхности. На больших дальностях связь осуществляется в режиме боковой волны – ослабление сигнала идет по степенному закону. На рис. 5 показано ослабление поля в зависимости от наличия леса на двух дистанциях от антенны и отсутствия леса.

Также исследовалась зависимость ослабления электромагнитного поля от дальности для различных высот леса (рис. 7). Чем выше располагается лесной массив, тем меньше энергии концентрируется в точке приема.

3. Влияние профиля местности и леса на поле фазированной антенной решетки для трехмерной модели пространства.

При проектировании мощных радиотехнических (РТС) существует необходимость оценки величины напряженности электромагнитного поля с учетом сложного рельефа местности, включающего неровности земной поверхности, лесные массивы, здания и др. Хотя примеры применения метода параболического уравнения (МПУ) в трехмерном случае приведены в монографии [7], решение трехмерных задач на массовых компьютерах пока не достигло высокого уровня. Необходимость в таких расчетах особенно важна для антенн типа фазированных антенных решеток (ФАР) с большим числом элементов. Именно этот случай рассмотрен ниже.

В разработанном методе источник сигнала – плоская ФАР вертикальная либо с небольшим наклоном с элементами – полуволновыми вибраторами. Каждый элемент задается диаграммой направленности и мощностью излучения. Взаимодействие полей элементов в данной реализации не учитывается, но может быть учтено по известному алгоритму [8]. Метод ПУ в трехмерном случае реализован с применением быстрого преобразования Фурье по поперечным декартовым координатам. Дальнейшие особенности алгоритма изложены в [9].

Конкретные расчеты проведены для решетки вибраторов 10×10 элементов, расстояние между соседними элементами – 0.5λ . Высота расположения над землей центра ФАР – 8 м. Поляризация излучения – вертикальная. Рабочая частота 450 МГц. Режим излучения – непрерывный. Геометрия задачи в общем виде приведена на рисунке 6. Препятствие задается двумерной поверхностью или лесным массивом произвольной формы с эффективной диэлектрической проницаемостью. Длина подошвы холма составляет 100 м, высота холма по максимуму – 10 м, высота леса 14 м. Эффективная диэлектрическая проницаемость смешанного леса $1.1 - i0.004$, подстилающей поверхности $20 - i0.4$.

Начальное распределение поля для ПУ рассчитывалось в приближении геометрической оптики на расстоянии 40 м от ФАР с учетом отражения от плоской земли. Сечение с заданием начальных условий может находиться как в промежуточной, так и в дальней зоне ФАР. Расчет поля методом ПУ проводился до расстояния 300 м. На рисунке 7 линией 1 показана зависимость модуля напряженности электрического поля над плоской поверхностью Земли в отсутствие препятствия, линией 2 — при наличии препятствия в виде холма, линией 3 — при наличии холма с лесом.

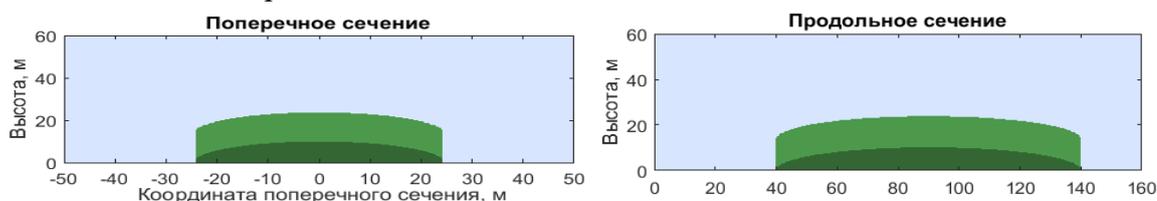


Рис. 6. Геометрия холма и лесного массива на поверхности Земли

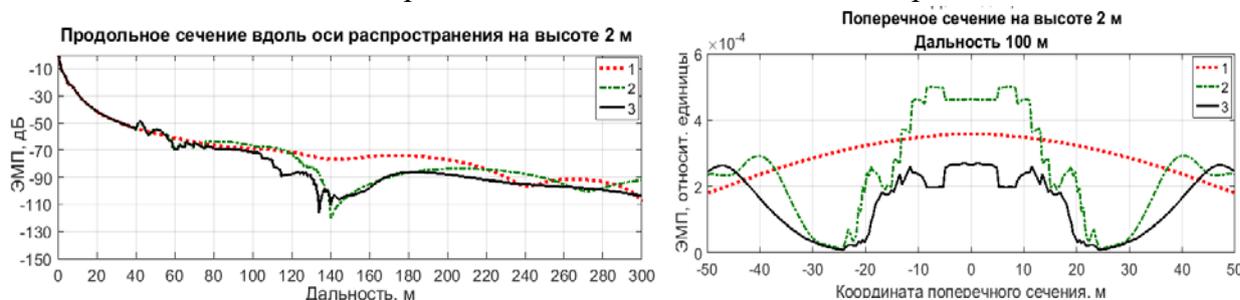


Рис. 7. (а) – изменение модуля напряженности электрического поля вдоль трассы, (б) – изменение модуля напряженности электрического поля в поперечном сечении трассы на расстоянии 100 м от антенны.

На рис. 7а приведены результаты расчета модуля напряженности электрического поля вдоль трассы в плоскости симметрии препятствия от дальности над высоту 2 м над землей, на рис. 7б – в поперечном сечении на расстоянии 100 м от антенны. Из рисунка 7 видно, что

поле над плоской Землей плавно колеблется на всем интервале расчета, так как длина промежуточной зоны с учетом зеркального источника составляет свыше 700 м. Влияние холма приводит к осцилляциям напряженности поля в освещенной части холма и ослаблению в зоне тени. В лесном массиве поле по величине близко к полю над холмом без леса и затухает в пределах леса незначительно из-за небольшой длины леса и малых потерь в лесу. Непосредственно за препятствием поле имеет глубокий дифракционный минимум. Начиная с 200 м величина поля восстанавливается практически до значения в отсутствие препятствия.

4. Заключение.

Метод ПУ в двумерном случае позволил проанализировать условия РРВ внутри лесного массива, а также оценить влияние формы полога леса на РРВ от антенны [10]. В трехмерном случае реализован метод ПУ для расчета структуры электромагнитного поля ФАР с большим числом элементов над поверхностью Земли при наличии сложных препятствий в зоне Френеля. Метод позволяет провести расчет санитарно-защитных зон и зон ограничения застройки вблизи мощных ФАР с учетом профиля местности и при наличии препятствий. В [11] приведены результаты расчетов поля ФАР при других видах препятствий.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (проект №8.9598.2017/БЧ).

Библиографический список

1. Tamir T. On radio-wave propagation in forest environments // *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, 1967, vol. AP-15, No. 6. – Pp. 806–817.
2. Dence D, Tamir T. Radio loss of lateral waves in forest environments // *Radio science*, 1969, Vol. 4, No. 4. – Pp. 307–318.
3. Tamir T. Radio wave propagation along mixed paths in forest environments // *IEEE Tr. AP*, 1977, Vol. AP-25, No. 4. – Pp. 471–477.
4. Попов В.И. Распространение радиоволн в лесах – М.: Горячая линия Телеком, 2015. – 392 с.
5. Sarabandi K., Polatin P. F., Ulaby F. T. Monte Carlo simulation of scattering from a layer of vertical cylinder // *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, 1993, Vol. 41. – Pp. 465–475.
6. Sarabandi K., Koh I.-S. Effect of canopy-air interface roughness on HF-VHF wave propagation in forest // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2002, Vol. 50, No. 2 – Pp. 111–121.
7. Levy M. Parabolic equation methods for electromagnetic waves propagation. London, UK, IEE, 2000.
8. Sazonov D.M. The Matrix Theory of Antenna Arrays. – Taganrog: YuFU, 2013, 98 p.
9. Mikhailov M.S., Permyakov V.A., Malevich E.S. Calculation by the method of parabolic equation in three-dimensional space with obstacles // *Russian Physics Journal*, 2016, Vol. 59, No.12-3 – Pp. 144–148.
10. Пермяков В.А, Михайлов М.С., Малевич Е.С. Моделирование распространения радиоволн в лесных массивах // Сборник докладов V Всероссийской микроволновой конференции, 2017, Москва ИПЭ РАН, 29 ноября — 1 декабря, с. 100–103.
11. Permyakov V.A., Mikhailov M.S., Malevich E.S. Calculation of the radar station field in 3D space in the presence of forest and other obstacles by the method of parabolic equation // *2017 Progress In Electromagnetics Research Symposium - Spring (PIERS)*, St Petersburg, Russia, 2017. – Pp. 3754-3757.