

Моделирование распространения радиоволн над нерегулярной земной поверхностью с лесными массивами с использованием метода параболического уравнения

Е.С. Малевич, М.С. Михайлов, В.А. Пермяков

Национальный исследовательский университет «МЭИ», 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, 17, e-mail malevichmpei@gmail.com

Представлено использование метода параболического уравнения для моделирования задач распространения радиоволн над нерегулярной поверхностью сложного профиля с лесными массивами. Обсуждается возможность использования полученных численных результатов для оценки санитарно-защитных зон и вырубки лесов вблизи крупных антенных систем.

The use of the parabolic equation method for modeling the propagation of radio waves over an irregular surface of a complex profile with forest massifs is presented. The possibility of using the obtained numerical results for the assessment of sanitary protection zones and deforestation near large antenna systems is discussed.

Введение

Исследование проблемы распространения радиоволн в реальных условиях окружающей среды остается актуальной темой на сегодняшний день. На пересеченной местности неровности земной поверхности и леса представляют собой важный фактор, влияющий на распространение радиоволн на большом расстоянии. В задачах локации, беспроводной радиосвязи, дистанционного зондирования рассеяние и поглощение на деревьях, затухание и фазовый сдвиг сигнала значительно влияют на прием и обнаружение цели. Поэтому проблема распространения радиоволн в лесах имеет важную практическую ценность.

Метод параболического уравнения (МПУ) был впервые предложен для моделирования подводного акустического распространения волн М.А. Леонтовичем и Фоком в 1940 году [1]. Одной из основных проблем в то время было как можно раньше обнаружить подводные лодки, это безусловно потребовало хорошего понимания подводного акустического распространения волн: воды с переменной плотностью, нижние профили и потоки. Позже подобная методика стала популярной при моделировании распространения электромагнитных волн между землей и тропосферой. Несмотря на то, что Леонтович и Фок оказались пионерами в этой области, подход МПУ становится знаменитым после введения алгоритма пошагового преобразования Фурье. С тех пор техника МПУ была улучшена в сочетании со многими вспомогательными инструментами и применена к множеству сложных проблем распространения.

Сравниваясь с экспериментальными результатами, Т. Тамир в [2] предложил рассматривать лес как диссипативный диэлектрический слой с эффективной диэлектрической проницаемостью близкой к 1 при решении задач распространения радиоволн в диапазоне частот 2-200 МГц.

В последние десятилетия ученые в нашей стране и за рубежом провели множество исследований проблем распространения радиоволн над неровной земной поверхностью и в лесу в том числе и с использованием метода параболического уравнения. Источники располагают как внутри, так и вне леса [3]. Через конечно-разностные алгоритмы параболического уравнения проблемы распространения радиоволн над нерегулярным ландшафтом, частично покрытым лесом, решаются [4], результаты сравниваются с

экспериментом. Поведение электромагнитного поля в областях, охваченных лесом, также анализируется на основе алгоритма пошагового преобразования Фурье.

При использовании однородного частого шага ПУ сильно будут увеличиваться расчетные ресурсы и время получения результата, при задании редкого шага упадет точность вычислений. Для решения этой проблемы можно применять неравномерный шаг в ПУ, за счет которого увеличивается эффективность вычислений для решения задач распространения радиоволн на большие расстояния.

В докладе основное внимание уделяется распространению радиоволн за пределами городов, поскольку передача антенны большой мощности принимается в территории, вывезенной из городов. Предложенная методология позволяет рассчитывать санитарно-защитные зоны и зоны ограничения строительства, планирования посадки или вырубки лесов для улучшения эффективности антенных систем.

2. Обзор метода параболического уравнения

В прямоугольной системе координат будем считать плоскую волну $\exp(-i\omega t)$, зависящей от времени, где ω – угловая частота. Компонента поля удовлетворяет двумерному скалярному волновому уравнению:

$$\frac{\partial^2 \psi(x, z)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi(x, z)}{\partial z^2} + k_0^2 n^2 \psi(x, z) = 0. \quad (1)$$

Здесь ψ – электрическое поле для горизонтальной поляризации и магнитное поле для вертикальной, k_0 – волновое число в вакууме, n – показатель преломления. Вводим функцию U , связываем её с координатой x .

$$U(x, z) = \exp(-ik_0 x) \psi(x, z). \quad (2)$$

Подставляя (2) в (1) и применяя операцию факторизации [5], получаем параболическое уравнение в виде:

$$\frac{\partial U}{\partial x} = -ik_0 (1 - Q) U. \quad (3)$$

Здесь Q – псевдодифференциальный оператор, который определяется как

$$Q = \sqrt{\frac{1}{k_0^2} \frac{\partial^2}{\partial z^2} + n^2} \quad (4)$$

Стандартным ограничением для используемого параболического уравнения является параксиальное (малоугловое) приближение. Оно применимо для антенн с шириной диаграмм направленности до 10 градусов. Вывод широкоугольного параболического уравнения основан на формальной факторизации уравнения Гельмгольца с использованием псевдодифференциальных операторов. Подобный подход позволяет обобщить численное решение параболического уравнения и на слабонаправленные антенны.

С помощью приближения [6] из Q получается широкоугольное параболическое уравнение

$$\frac{\partial U(x, z)}{\partial x} = ik_0 \left[\sqrt{1 + \frac{1}{k_0^2} \frac{\partial^2}{\partial z^2}} - 1 \right] U(x, z) + ik_0 (n - 1) U(x, z). \quad (5)$$

В таком виде параболическое уравнение можно решить с помощью пошагового преобразования Фурье, представленного в виде:

$$U(x_0 + \Delta x, z) = \exp(ik_0 \Delta x (n - 1)) \cdot F^{-1} \left\{ \exp(i \Delta x \left(\sqrt{k_0^2 - p^2} - k_0 \right)) \cdot F[U(x_0, z)] \right\}. \quad (6)$$

Здесь $U(x_0, z)$ – начальное поле, Δx – шаг по дальности, F и F^{-1} – прямое и обратное преобразования Фурье, $p = k_0 \sin \alpha$, где α – скользящий угол.

Решение параболического уравнения (ПУ) с помощью пошагового преобразования Фурье позволяет вычислять значения поля для каждой отметки дальности через определенный шаг. Шаг по дальности почти не ограничен волновым числом, что позволяет использовать этот метод решения ПУ для крупных задач и сложных моделей в том числе с неровностями земной поверхности и лесами.

3. Результаты численного моделирования распространения радиоволн над земной поверхностью со сложным ландшафтом

Лес является случайной неоднородной средой, со структурными элементами в виде лесной подстилки, стволов, ветвей, листьев, приводящих к затуханию, рассеянию, дифракции и поглощению излучаемых электромагнитных волн. В общем случае выделяют два подхода. Первый заключается в построении регулярной электродинамической модели, в которой лес характеризуется как диэлектрическая среда с потерями с заданной усредненной эффективной диэлектрической проницаемостью (ЭДП). Количественные значения ЭДП могут быть получены из экспериментальных данных, например, это могут быть натурные эксперименты по измерению затухания в лесу. Второй подход основан на использовании статистических моделей. Данные модели основаны на получении характеристик рассеяния на отдельных элементах лесного массива, каждый из которых имеет свои геометрические и диэлектрические характеристики.

В докладе используется электродинамический подход, измерения проводятся на частотах до 1 ГГц. Лес задается в виде многослойной модели (рис.1) с ЭДП каждого из слоев для соответствующей частоты и вида лесных деревьев из [7]. Задача состоит в оценке влияния лесного массива или неровной поверхности с лесным массивом на распространение радиоволн: потери на распространение, рекомендации по высотам подъема приемной и передающей антенн, исследование механизма распространения с помощью боковой волны вдоль кромки полого леса, возможность расчета санитарно-защитных зон и зон ограничения застройки.



Рис.1. Модель лесного массива.

Моделирование проводится для электродинамической модели, где двумерное пространство представлено четырьмя слоями: лесная подстилка, ствольная часть, лесной полог, воздух. Для задания характеристик каждого из слоев используется усредненная диэлектрическая проницаемость, которая зависит множества факторов: частоты, типа леса, вида деревьев, сезона года, влажности деревьев, густоты леса, поляризации электромагнитной волны. Для расчетов в данной статье брались значения ЭДП для средней плотности соснового леса летом с умеренной влажностью для вертикально поляризованной электромагнитной волны, опираясь на данные и формулы из монографии [7] в связи с отсутствием собственных экспериментальных исследований.

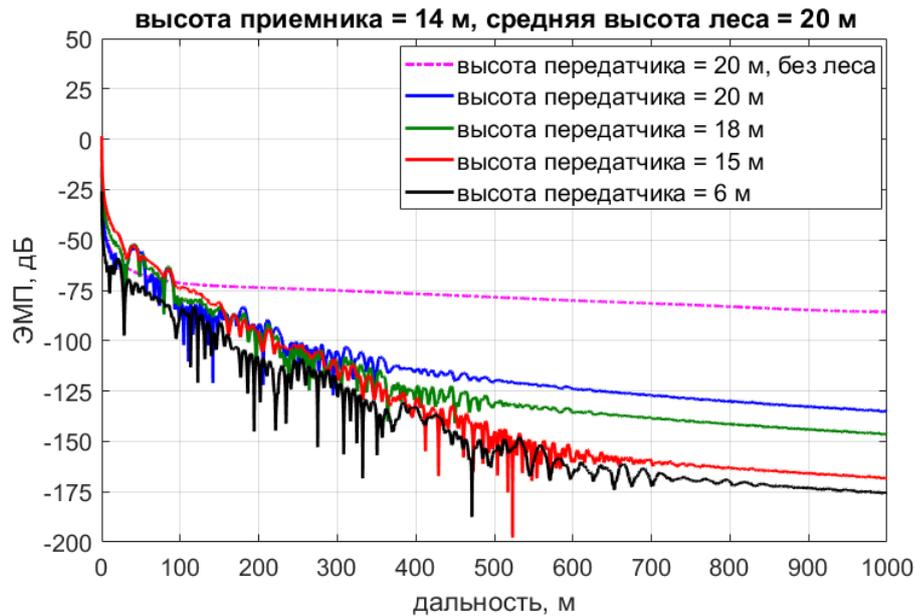


Рис.2. Зависимость электромагнитного поля от дальности для соснового леса на частоте 1 ГГц для разных высот подъема передатчика.

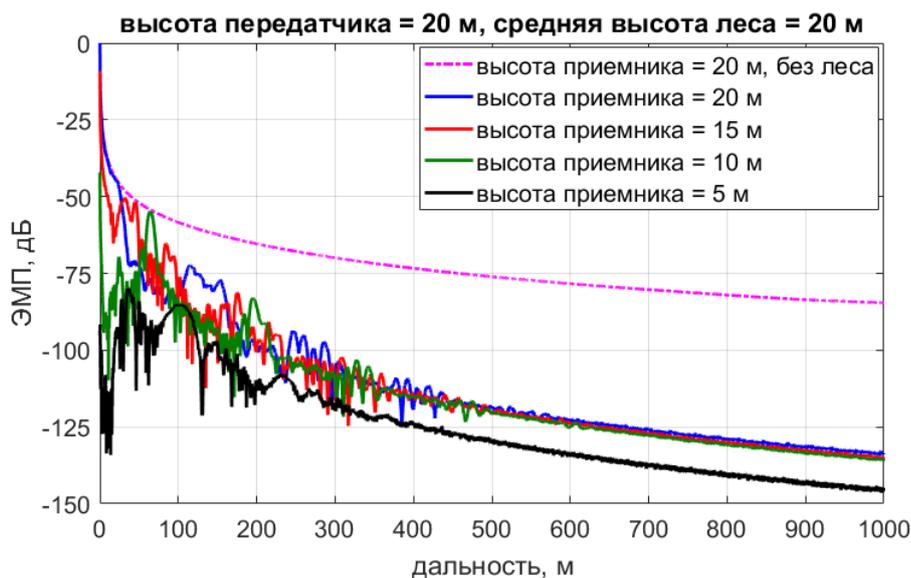


Рис.3. Зависимость электромагнитного поля от дальности для соснового леса на частоте 1 ГГц для разных высот подъема приемника.

Зависимость электромагнитного поля от дальности приведена на рис.2 для средней высоты соснового леса 20 м, лесной полог модулировался синусоидальной функцией с учетом плотности деревьев $0,12 \text{ м}^2$. [8]. На этих графиках варьируется высота подъема источника (рис.2), представляемого в виде гауссова пучка шириной 1,45 градусов с углом места 0 градусов, и передатчика (рис.3). Высота приемника составляет 10 м.

Из графика на рис. 2 видно, что чем ниже располагается антенна передатчика, тем дольше оказывается выход на режим боковой волны. Электромагнитное поле сильнее спадает за счёт прямых потерь и интерференции от подстилающей поверхности, механизм боковой волны обеспечивает меньшее затухание на больших расстояниях. За счёт этого дальность действия антенной системы может быть увеличена. Наилучшим случаем здесь является расположение передающей антенны на высоте леса: суммарные

потери оказываются меньше, быстрее осуществляется выход на режим боковой волны. На рисунке 3 для подъема передающей антенны на 18 метров видно, что потери не сильно зависят от высоты подъема приемника. Исходя из полученных данных, можно выбирать высоту подъема передатчиков и приемников для улучшения эффективности антенной системы. На рисунке 4 сравнивается распределение поля в отсутствие леса и с сосновым лесом высотой 20 м на ровной земной поверхности, высота передающей антенны также 20 м.

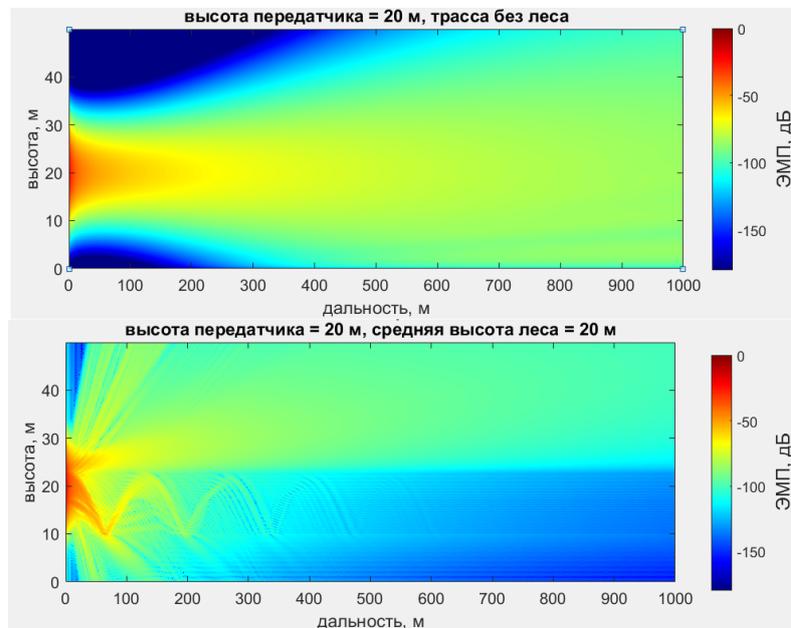


Рис.4. Картина распределения поля по высоте и дальности для соснового леса на частоте 1 ГГц.

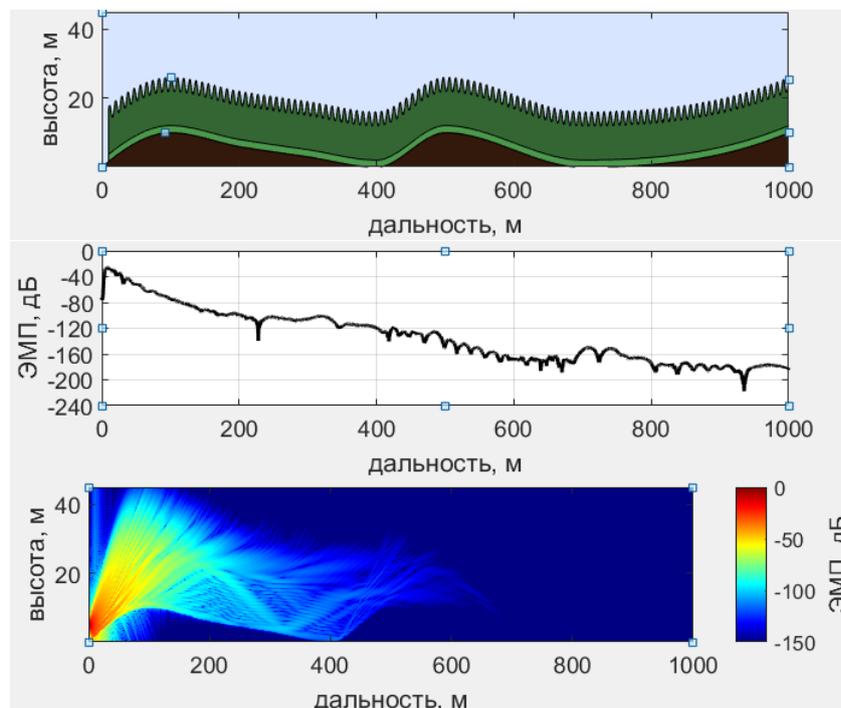


Рис.5. Картина распределения поля в условиях сложного ландшафта с неровностями и лесом на частоте 900 МГц.

На рисунке 5 из картины распределения поля видно как формируется картина дифракции на препятствии с учетом расположения на нём лесного массива. В условиях сложного рельефа местности наблюдается переотражение лучей от границы раздела воздух-лес, таким, образом, поле в лесу за препятствием превышает поле в воздухе над лесом. Боковую волну практически не видно, ослабление в лесу невелико, за препятствиями поле увеличивается за счет дифракции лучей и переотражения от верхней кромки полога леса. Подобную методику получения информации о картине распределения поля можно использовать вместе с электронными картами местности, из которых берут сведения о высоте подъема рельефа местности.

Заключение

В докладе представлены результаты моделирования распространения радиоволн над неровной земной поверхностью с учетом леса с помощью метода параболического уравнения. Лес представлен в виде многослойной структуры с потерями, что позволяет использовать электродинамический подход при решении задачи распространения радиоволн. Для расчета использовался метод параболического уравнения с быстрым преобразованием Фурье.

Результаты позволяют проанализировать картину распределения поля при разнообразных ландшафтах, выявить наиболее влияющие электродинамические эффекты. Получив информацию о характере потерь в лесу, подобную методику можно использовать для дистанционного зондирования земли, расчета санитарно-защитных зон и зон ограничения застройки, варьирования высоты подъема приемной и передающей антенн, оценки эффективности антенной системы, расположенной вблизи лесного массива.

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

Литература

1. Леонтович М.А. Об одном методе решения задач о распространении электромагнитных волн вдоль поверхности земли. /Известия АН ССР, сер. физ., 1944, т.8, № 1, с.16.
2. T. Tamir. On radio-wave propagation in forest environments // IEEE Trans. Antennas and Propagation, vol. AP-15, no. 6, pp. 806–817, 1967.
3. M Le Palud. Propagation modeling of VHF radio channel in forest environments // IEEE Military Communications Conference. vol. 2, pp. 609-614, October 2004.
4. P. Holm, G. Eriksson, P. Krans, B.Lundborg, E. Lafsved, U. Sterner, A. Waern. Wave propagation over a forest edge-parabolic equation modelling vs measurements // IEEE Symp. PIMRC. Lisboa Portugal, vol. 1, pp. 140-145, September 2002.
5. M. Levy. Parabolic equation methods for electromagnetic waves propagation. London, UK, IEE, 2000.
6. M.D. Feit, J.A.Fleck. Light propagation in graded-index fibers // Applied Optics. vol. 17, pp. 3990-3998, 1978
7. Попов В. И. Распространение радиоволн в лесах / В. И. Попов. — Москва: Горячая линия Телеком, 2015. —392 с.
8. Пермяков В.А, Михайлов М.С., Малевич Е.С. Моделирование распространения радиоволн в лесных массивах // Сборник докладов V Всероссийской микроволновой конференции, 2017, Москва ИРЭ РАН, 29 ноября — 1 декабря, с. 100–103.