

Использование метода параболического уравнения для решения задачи распространения радиоволн при моделировании леса отдельными деревьями

А.А. Волкова, Е.С. Малевич

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ», 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д.14, E-mail: volkova-nastua@yandex.ru, malevichmpei@gmail.com

В данной статье приведен обзор существующих моделей лесного массива, необходимых для решения задач распространения радиоволн в нем. Освещены методы, с помощью которых производится расчет плотности потока мощности или напряженности электрического поля. Предложена методика построения модели леса, основанная на построении конструктора леса с помощью отдельных деревьев. Проведен расчет электромагнитного поля методом параболического уравнения на основе созданной модели.

This paper provides an overview of the existing forest models that are needed to solve problems of radio wave propagation in it. Illuminated methods by which the calculation of the power flux density or electric field intensity. A technique for constructing a forest model based on constructing a forest constructor using individual trees is proposed. The electromagnetic field is calculated using the parabolic equation method based on the created model.

Введение

Задача распространения радиоволн в лесных массивах востребована уже долгое время. Интерес к данной теме вызван увеличением практического применения сотовой связи, радиолокации, радионавигации. Изучение механизмов распространения радиоволн лесу также необходимо для решения некоторых экологических задач. Одной из таких задач является оценка лесотаксационных и биометрических параметров лесного полога на основе данных аэрокосмического радиоволнового зондирования. Влияние лесной растительности на параметры электромагнитного излучения происходит практически во всех диапазонах частот, которые часто определяют особенности распространения волн вблизи земной поверхности. Изучение электродинамических характеристик лесной растительности включает определение ослабляющих и рассеивающих свойств растительности, а также определение электрофизических характеристик лесного массива, необходимых для описания лесной среды математической моделью. Определив соотношения энергетических характеристик сигнала, можно прогнозировать условия работы радиосредств в лесной местности с учетом параметров лесной растительности.

2. Модели представления лесных массивов.

Лесной массив представляет собой неоднородную диэлектрическую среду со случайно расположенными и ориентированными структурными элементами: стволы, ветви, листья (хвоинки).

Существует две модели представления леса, используемые для описания механизма распространения радиоволн в нем. Первая – электродинамическая, в ней используется представление лесного массива в виде однородного слоя с комплексной диэлектрической проницаемостью, граничащего сверху с воздухом. Данная модель была предложена в 60-70-х годах [1] – [5] и используется до сих пор. Существует

множество вариантов усложнения данной модели. Чаще всего используется трехслойный вариант, где земля представляется однородным диэлектрическим полупространством с потерями, лес – изотропным плоским слоем диэлектрика с потерями, и сверху располагается однородный слой воздуха над лесом. Второй вариант электродинамической модели тоже трехслойный, но в этом случае лес представляется анизотропным диэлектриком с диагональным тензором диэлектрической проницаемости. Возможно усложнение до четырехслойной модели, в данном случае слой леса разбивается на два. Нижний слой характеризуется диэлектрической проницаемостью стволов, а верхний – листьев и веток. Следующим шагом является введение анизотропности, каждый слой описывается тензором диэлектрической проницаемости.

Анизотропия диэлектрической проницаемости вводится для учета влияния стволов деревьев, расположенных перпендикулярно земной поверхности. Электродинамическая модель считается основной для описания УКВ в лесистой местности. Решение задачи распространения радиоволн основывается на теории волн в слоистых средах. Волны, отраженные от границ слоев, описываются с помощью законов геометрической оптики.

Сравнительно недавно для расчета распространения радиоволн в различных средах стали использовать метод параболического уравнения. Метод параболического уравнения впервые был предложен М. А. Леонтовичем и Фоком в 1940 году. Этот метод в начале использовался для решения задач подводного акустического распространения радиоволн. Впоследствии данный метод стал использоваться для случая распространения электромагнитного поля между земной поверхностью и тропосферой. В настоящее время данный метод используется для расчета интенсивности электромагнитного поля над нерегулярной поверхностью, такие как городская застройка, морская поверхность или лесной массив [6] – [7]. В работе [7] расчет распространения радиоволн в лесном массиве, проводится методом параболического уравнения для случая слоистой модели леса.

Недостатком электродинамической модели является невозможность рассмотреть реальные механизмы распространения радиоволн через лесной массив. Это происходит из-за отсутствия связи электрических характеристик слоя с элементами растительности.

Вторая модель статистическая. В данном случае лес представляется набором типичных рассеивателей. Стволы деревьев моделируются бесконечными цилиндрами, хвоинки и ветви – конечными цилиндрами, а листья плоскими дисками. Либо представлять стволы конечными цилиндрами, а ветви и листья объединить в крону, которая будет моделироваться эллипсом. Все элементы леса случайно расположены и случайно ориентированы. Для того чтобы учитывать потери, элементам растительности задают комплексную диэлектрическую проницаемость. Для данной модели предполагается, что плотность растительности невелика. Благодаря данному упрощению, расчет характеристик поля можно провести на основе теории распространения радиоволн в среде со случайными рассеивателями. Принято рассчитывать рассеяние от каждой группы (листья, стволы, ветви) по отдельности, в дальнейшем суммируя полученные результаты.

Положительной особенностью данного метода является возможность получить биометрические параметры леса и энергетические характеристики поля на статистической модели.

Минусом же метода является сложность описания многократного рассеяния. Также ставится задача описания рассеивающих свойств каждого элемента леса. Еще одной сложностью возникающей при реализации метода является учет обратного рассеяния и многократного переотражения от отдельных деревьев. Для этого необходима высокая точность расчета, которая требует большие требования к аппаратному обеспечению.

3. Описание модели конструктора леса.

В данной статье описывается конструктор леса, используемый для представления леса в виде статистической модели. Расчет проводился для частоты сигнала равной 450 МГц. В качестве излучателя использовалась фазированная антенная решетка 10×10 одинаковых элементов с шагом $0.5 \cdot \lambda$ между ними.

Расчет электромагнитного поля выполнялся методом параболического уравнения. Математическая постановка задачи для параболического уравнения предполагает задание начального распределения поля, затем использование алгоритма пошагового преобразования Фурье для непосредственно решения параболического уравнения. Для того, чтобы воспользоваться методом параболического уравнения, необходим ввод граничных условий на верхней, нижней и боковых границах расчета. Для обеспечения условий затухания на открытых пространствах, используется поглощающее условие по типу окна прозрачности Хэмминга, которое увеличивает поглощение при удалении от зоны расчета, исключая отражение электромагнитных волн обратно.

Таким образом, первым этапом работы алгоритма разработанного конструктора является расчет начального условия. В его качестве выступает амплитудно-фазовое распределение электрического поля. Его расчет происходит в приближении геометрической оптики с учетом отражения электромагнитной волны, созданной элементом ФАР, от плоской земной поверхности. Предполагается, что известна амплитудно-фазовая диаграмма направленности отдельного элемента ФАР.

В декартовой системе координат трехмерное волновое уравнение запишется:

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

где

$$u(x, y, z) = \exp(-ikx)\psi(x, y, z).$$

Для численного решения необходимо аппроксимировать экспоненциальный оператор. Для удобства расчета следует разделить y и z :

$$Y = \frac{1}{k^2} \frac{\partial}{\partial y^2}, \quad (2)$$

$$Z = \frac{1}{k^2} \frac{\partial}{\partial z^2} + n^2 - 1. \quad (3)$$

Тогда для малоуглового параболического уравнения 3D запишется:

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{ik}{2}(Y + Z)u. \quad (4)$$

А поле на последующем шаге будет вычисляться:

$$u(x + \Delta x, y, z) = \exp\left(ik\Delta x\sqrt{1+Y} - 1\right) \cdot \exp\left(\frac{ik\Delta x}{2}Z\right) \cdot u(x, y, z). \quad (5)$$

На каждом шаге для каждого x при переходе на следующий шаг вычисляется показатель преломления для всех точек поперечного среза пространства. Для данной операции необходимо знать, какие объекты располагаются в текущем срезе. В конструкторе дерева задаются в виде отдельных элементов: цилиндры для реализации стволов и эллипсоиды вращения для крон деревьев. На основании свойства основного уравнения для эллипсоида и цилиндра определяется, принадлежит ли каждая точка данного среза кроне или стволу того или иного дерева:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} < 1, \quad (6)$$

где a, b, c – это произвольные случайные числа. Величины a и b являются полюсами эллипсоида. Для данного случая $a = b$.

Выражение для цилиндров:

$$\frac{x^2 + y^2}{R^2} < 1 \text{ и } 0 < z < H_{\text{цилиндра}}$$

где R – радиус, H – высота.

В расчете высота отсчитывается не от 0, а от уровня земной поверхности. Зоны, принадлежащие деревьям, расположенным на текущем срезе, суммируются для определения общих зон, занимаемых листвой крон и стволами. Этим зонам задаются определенные значения показателя преломления.

В связи с большими требованиями к точности расчета значительно возрастают сложность и ресурсоемкость задачи. Для выполнения данного расчета использовалась сетка с шагом $0.2 \times 0.2 \times 0.2$ м по дальности, ширине и высоте соответственно. Поскольку некоторые деревья имеют ствол меньше 20 см, то предпочтительно размещать оси деревьев в узлах сетки пространства. Таким образом, минимальная толщина дерева оказывается равна шагу разбиения пространства.

Запоминая вычисленный показатель преломления можно составить картину расположения деревьев в пространстве. На рисунке 1 приведена схема расположения деревьев в пространстве, не учитывающая конкретные параметры крон и стволов. Красной точкой в начале координат отмечена излучающая антенна. На последующих рисунках представлены показатели преломления на различных дистанциях от антенны.

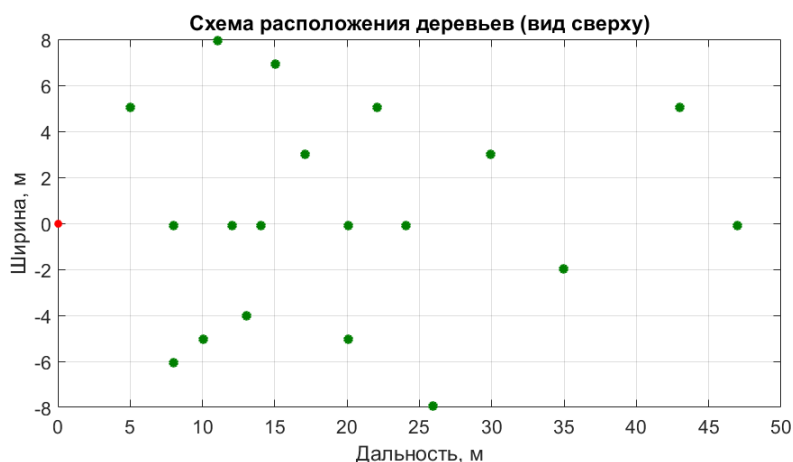


Рис. 1. Схематичный график расположения деревьев в конструкторе леса

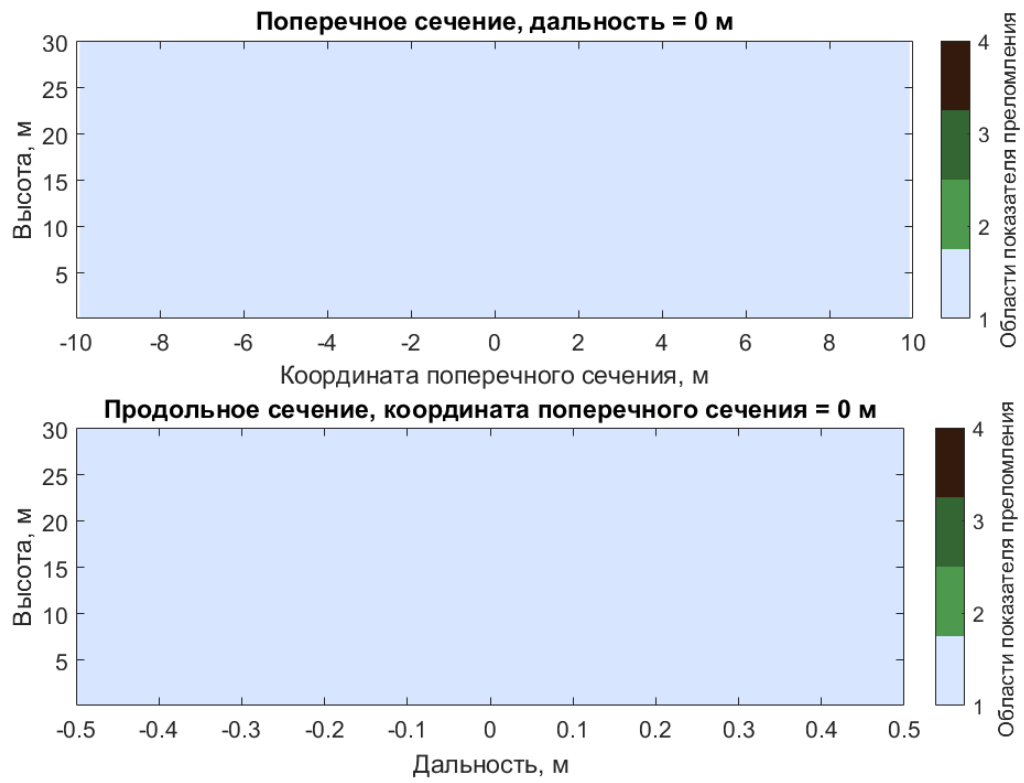


Рис. 2. Показатель преломления в сечениях на дальности 0 м

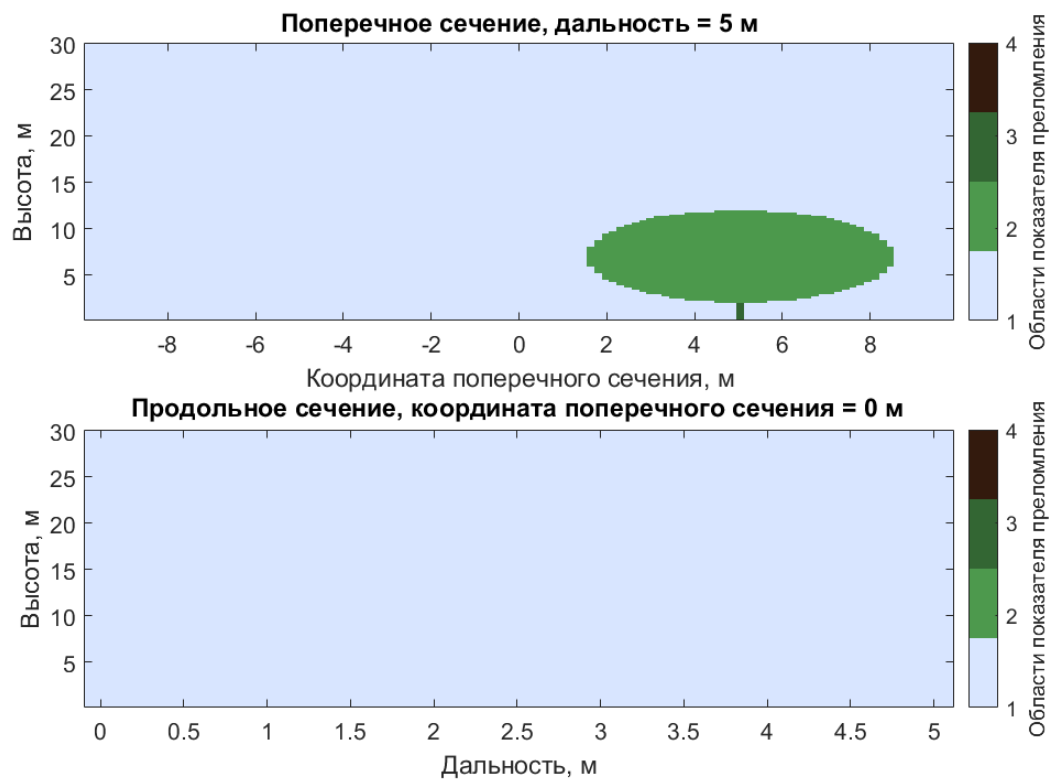


Рис. 3. Показатель преломления в сечениях на дальности 5 м

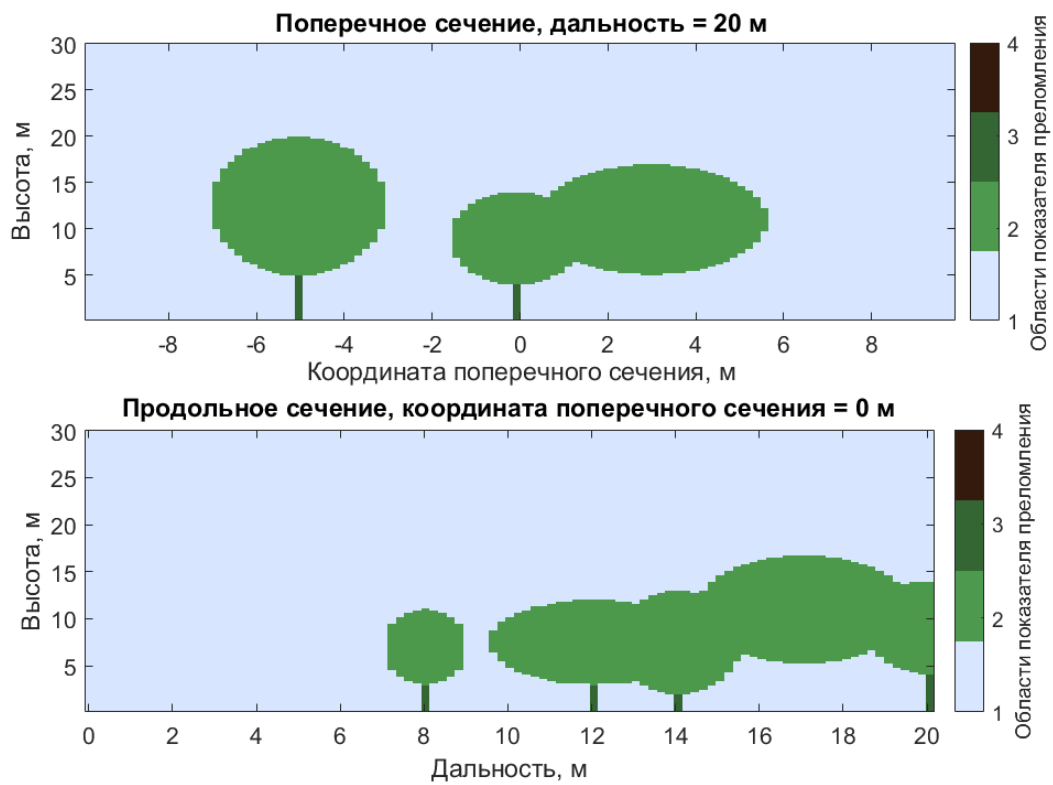


Рис. 4. Показатель преломления в сечениях на дальности 20 м

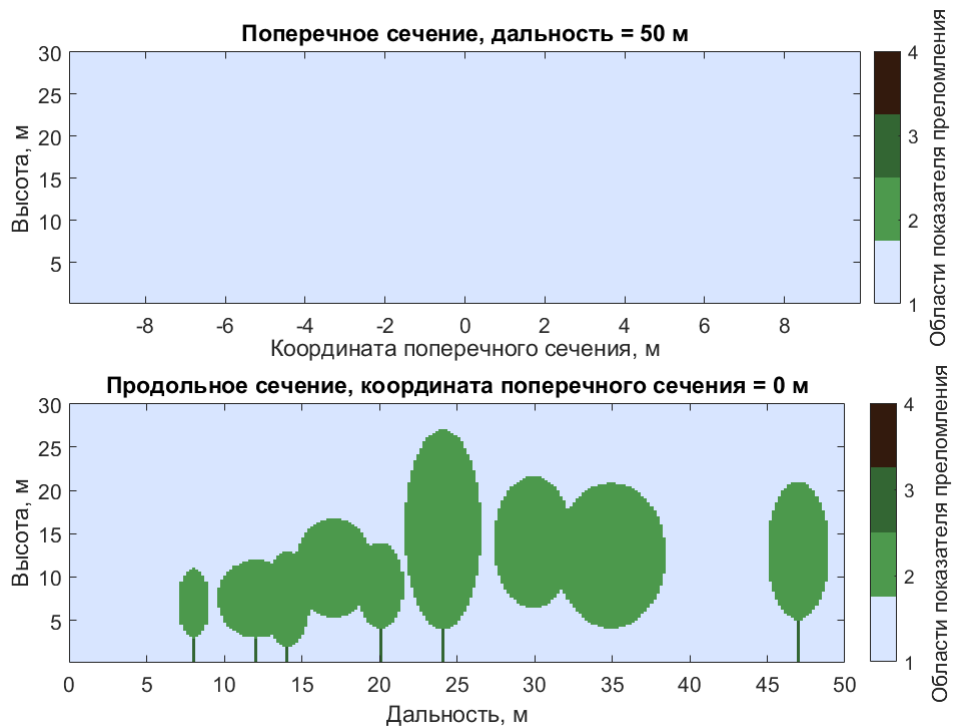


Рис. 5. Показатель преломления в в сечениях на расстоянии 50 м

Программа выполняет расчет по дальности с шагом 0.2 м. Лесная посадка находится на некотором расстоянии от антенной решетки. Поэтому на рисунке 2, соответствующему нулевой дальности, не наблюдается деревьев.

По введенным данным первые три дерева появляются на дистанции равной 5 метрам. Что и демонстрирует рисунок 3. На рисунке 4 продемонстрировано распределение показателя преломления на дистанции 20 м, где уже на продольном сечении получены деревья. Расчет проводился на расстоянии до 50 метров. На рисунке 5 продемонстрирован окончательный результат расчета.

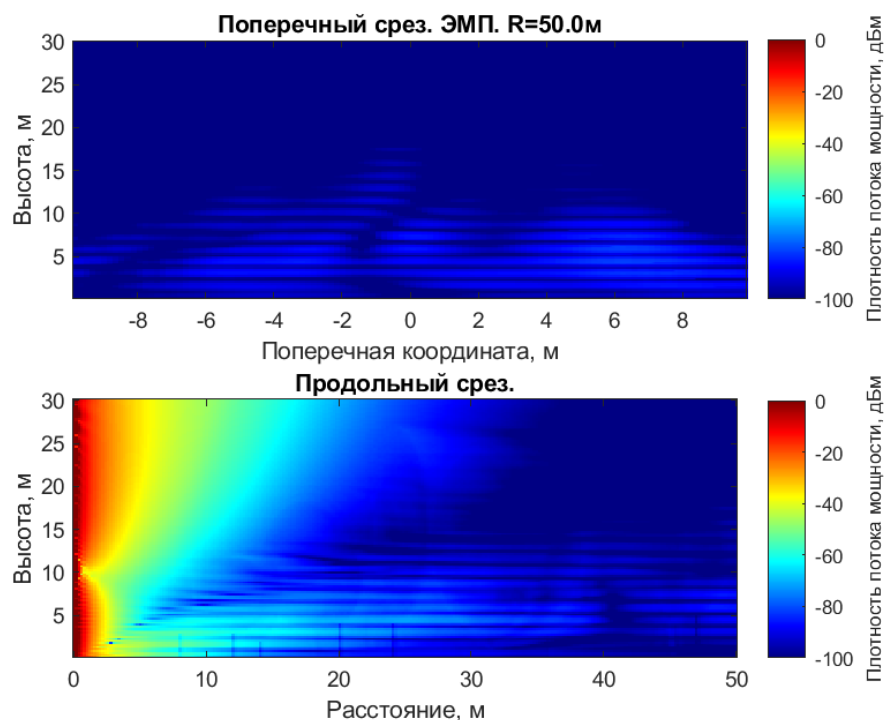


Рис. 6. Плотность потока мощности в условии лесного массива на расстоянии 50 м

На рисунке 6 представлен результат моделирования в программе, основанной на расчете электромагнитного поля с использованием метода параболического уравнения, в виде распределения поля по дальности и высоте. Отсюда можно проанализировать механизмы поглощения поля в лесу и распространение радиоволн с помощью боковой волны. Видно, что затухание поля происходит по степенному закону на больших расстояниях, это не противоречит ранее полученным результатам экспериментов и теоретическим исследованиям [8, 9].

Заключение

В данной статье представлен вариант конструктора леса. Предложенный конструктор леса позволяет моделировать реальные случаи расположения деревьев на местности, исходя из заранее снятых экспериментально параметров отдельных деревьев. Чтобы получить результаты для случайного лесного массива необходимо провести множественные расчеты с различным расположением деревьев в пространстве, вариацией параметров стволов и крон, изучая математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение необходимых величин. С помощью метода параболического уравнения осуществлен расчет плотности потока мощности, построена картина распределения поля по высоте и дальности в пространстве, из которой можно проанализировать основные механизмы распространения радиоволн в лесу. Используя предложенный конструктор, в дальнейшем возможно построение

статистической модели леса, основанной на расчете коэффициента поглощения с использованием метода параболического уравнения. Это позволит эффективно рассчитывать прогнозируемое распространение радиоволн вдоль реальной трассы с учетом её особенностей.

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

Литература

1. J.R. Wait. Radiation from dipoles in an idealized jungle environment / Radio Sci.-1967.– V.2.–№7.– p.747–750.
2. T. Tamir. On radio-wave propagation in forest environments.// IEEE Trans. Antennas Propagat. –1967. – V. AP-15. – № 6. – p.806–817.
3. D. Dence, T. Tamir. Radio loss of lateral wave in forest environment.// Radio Sci.-1969. – V.4. – № 4. – p.307–318.
4. T. Tamir. Radiowave propagation along mixed paths in forest environments //IEEE Trans. Antennas and Propag. – 1977. –V.25. – №4. – p.471–475.
5. D.L. Sachs, P.J. Wyatt. A conducting-slab model for electromagnetic propagation within jungle medium.// Radio Sci. – 1968. – V.3.–№2. – p.125–134.
6. M.S. Mikhailov, E. S. Malevich and V. A. Permyakov. Modeling of Radio-wave Propagation in Forest by the Method of Parabolic Equation // in International Journal of Engineering & Technology, vol.7 (2.23), 2018, pp. 111–113.
7. M.S. Mikhailov, E. S. Malevich and V. A. Permyakov. Evaluation of the Impact of Deforestation on the Radio Wave Propagation near the Large Antenna System in the Calculation of Sanitary Protection Zones // in 2018 Progress In Electromagnetics Research Symposium – (PIERS), Toyama, Japan, 1–4 August, 2018.
8. Михайлов М.С., Пермяков В.А., Малевич Е.С. Расчет поля методом параболического уравнения в трехмерном пространстве с препятствиями // Известия высших учебных заведений. Физика. 2016. Т. 59. № 12-3. с. 145–148.
9. Малевич Е.С., Михайлов М.С., Кожевников К.Ю., Волкова А.А. Экспериментальное исследование распространения радиоволн в лесной растительности в X-диапазоне частот // Сборник трудов VI Микроволновой конференции, 2018, с. 237–241.