

УДК 621.391.812

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОХОЖДЕНИЯ РАДИОВОЛН ЧЕРЕЗ ЛЕС**

А.А. КАРПУК, Н.В. ЕВТИХИНА

*НИИ средств автоматизации  
пр. Независимости, 117, Минск, 220027, Беларусь**Поступила в редакцию 23 июня 2006*

Разработан алгоритм и комплекс программ для вычисления ослабления напряженности электромагнитного поля при прохождении радиоволн через лес для диапазона частот от 30 МГц до 3 ГГц. Комплекс программ представлен в виде DLL-библиотеки и интерактивного исполняемого модуля. Алгоритм и программы могут использоваться для моделирования прохождения радиоволн через лес в автоматизированных системах планирования радиосвязи.

*Ключевые слова:* распространение радиоволн, прохождение радиоволн через лес, планирование радиосвязи.

**Введение**

В автоматизированных системах планирования радиосвязи при вычислении напряженности электромагнитного поля в точке приема радиосигнала на частотах от 30 МГц до 60 ГГц должно учитываться влияние леса, находящегося на пути распространения радиоволн. На частотах до 30 МГц влияние леса несущественно, а на частотах более 60 ГГц лес следует считать препятствием, через которое не проходят радиоволны. Методы оценки ослабления напряженности электромагнитного поля при прохождении радиоволн через лес для частот от 30 МГц до 60 ГГц описаны в Рекомендации ITU-R P.833-5 [1]. В этой Рекомендации отдельно рассматриваются случаи, когда электрический центр антенны передатчика или приемника расположен ниже верхней кромки леса и когда трасса распространения радиоволн пересекает лес. Для последнего случая приведены расчетные формулы вычисления ослабления напряженности электромагнитного поля при прохождении радиоволн через лес для диапазона частот от 30 МГц до 3 ГГц и диапазона частот выше 5 ГГц. Однако вычисления по приведенным формулам чаще всего дают сильно завышенное значение ослабления напряженности электромагнитного поля, поскольку, кроме прямого прохождения радиоволн через лес, возможно прохождение радиоволн путем дифракции по верхушкам деревьев со значительно меньшим ослаблением напряженности поля. Кроме того, Рекомендация ITU-R P.833-5 не дает метода вычисления величины ослабления напряженности электромагнитного поля при прохождении радиоволн через лес, которая не будет превышена в течение заданного процента времени. Целью настоящей работы является разработка алгоритма и комплекса программ для вычисления величины ослабления напряженности электромагнитного поля при прохождении радиоволн через лес для диапазона частот от 30 МГц до 3 ГГц с учетом прямого прохождения радиоволн через лес, дифракции радиоволн по верхушкам деревьев и заданного процента времени, в течение которого вычисленная величина ослабления не будет превышена.

## Постановка задачи

Для заданной трассы распространения радиоволн вычислить величину ослабления напряженности электромагнитного поля  $L_f$  в дБ при прохождении радиоволн через лес, имеющийся на трассе, которая не будет превышена в течение заданного процента времени  $T$ . Профиль рельефа местности на трассе задается в виде пар чисел  $(d_i, h_i), i = \overline{0, n}$ , где  $d_i$  — расстояние по дуге большого круга в метрах от точки профиля с индексом 0 до точки профиля с индексом  $i$  (очевидно, что  $d_0=0$ ), а  $h_i$  — высота местности над уровнем моря в метрах в точке профиля с индексом  $i$ . Предполагается, что в точке с индексом 0 расположен передатчик, а в точке с индексом  $n$  расположен приемник. Участки леса на трассе распространения радиоволн задаются в виде пар чисел  $(d_{f1i}, d_{f2i}), i = \overline{1, n_f}$ , где  $d_{f1i}$  — расстояние от точки стояния передатчика до начальной точки участка леса по дуге большого круга в метрах,  $d_{f2i}$  — расстояние от точки стояния передатчика до конечной точки участка леса по дуге большого круга в метрах,  $n_f$  — число участков леса на трассе. Описание участков леса на трассе можно построить с использованием соответствующего слоя электронной карты местности. Считаются известными следующие величины:

- высоты электрических центров антенн передатчика и приемника над поверхностью Земли  $h_t$  и  $h_r$  соответственно в м;
- частота радиоволн  $f$  в ГГц;
- значение эффективного радиуса Земли для трассы  $a_e$  в км, которое будет превышено в течение 50% времени;
- значение эффективного радиуса Земли для трассы  $R_e$  в км, которое будет превышено в течение процента времени  $T$ ;
- тип леса (обычный или тропический) и средняя высота деревьев в лесу  $h_f$  (по умолчанию может быть принята равной 10–15 м для обычного леса и 30–40 м для тропического леса);
- поляризация радиоволн (вертикальная или горизонтальная).

## Алгоритм решения задачи

Алгоритм вычисления ослабления напряженности электромагнитного поля при прохождении радиоволн через лес для частот от 30 МГц до 3 ГГц, разработанный на основе Рекомендации ITU-R P.833-5 [1], состоит из следующих шагов.

1. Используя методы и алгоритмы моделирования дифракции радиоволн на препятствиях, описанные в работе [2], вычислить следующие величины:

профиль рельефа местности на трассе распространения радиоволн  $(d_i, H_i), i = \overline{0, n}$ , пересчитанный с учетом кривизны Земли;

число  $k$  точек преломления пути радиоволн от электрического центра антенны передатчика к электрическому центру антенны приемника, координаты точек преломления  $(d_{pi}, H_{pi}), i = \overline{1, k}$ ;

величину ослабления напряженности электромагнитного поля  $L_d$  за счет дифракции радиоволн на препятствиях, имеющихся на трассе без учета леса, которая не будет превышена в течение заданного процента времени  $T$ .

2. На основе профиля рельефа местности на трассе распространения радиоволн  $(d_i, H_i), i = \overline{0, n}$ , и описания участков леса на трассе  $(d_{f1i}, d_{f2i}), i = \overline{1, n_f}$ , построить профиль леса на трассе  $(d_{fi}, H_{fi}, p_{fi}), i = \overline{0, N_f}$ , где  $d_{fi}$  — расстояние от точки стояния передатчика до точки профиля леса по дуге большого круга в метрах,  $H_{fi}$  — высота точки профиля леса в метрах,  $p_{fi}$  — признак точки профиля леса (равен 0 для начальной точки леса, 1 — для промежуточной точки леса и 2 — для конечной точки леса),  $(N_f+1)$  — число точек профиля леса. Высота точки профиля леса равна высоте местности в данной точке над уровнем моря, увеличенной на среднюю высоту деревьев  $h_f$ .

3. На основе профиля леса на трассе  $(d_{fi}, H_{fi}, p_{fi}), i = \overline{0, N_f}$ , и координат точек преломления пути радиоволн  $(d_{pi}, H_{pi}), i = \overline{1, k}$ , определить координаты отрезков пути радиоволн, проходящих через лес,  $(d_{0i}, H_{0i}), (d_{2i}, H_{2i}), i = \overline{1, o_f}$ , где  $(d_{0i}, H_{0i})$  — координаты начальной точки отрезка,  $(d_{2i}, H_{2i})$  — координаты конечной точки отрезка,  $o_f$  — число отрезков. Если  $o_f=0$ , то ослабление напряженности электромагнитного поля при прохождении радиоволн через лес  $L_f$  положить равным 0 и закончить работу.

4. Если  $d_{011}=0$ , т.е. электрический центр антенны передатчика расположен ниже верхней кромки леса, то вычислить длину первого отрезка пути радиоволн до выхода из леса  $d_{01}$  в м и вычислить ослабление напряженности электромагнитного поля на этом отрезке леса в дБ по формуле

$$A_{fi} = A_m [1 - \exp(-d_{01} \gamma / A_m)], \text{ где } A_m = A_1 (1000 f)^\alpha,$$

для вертикальной поляризации радиоволн в диапазоне частот от 30 МГц до 1 ГГц величина  $\gamma$  вычисляется по формуле  $\gamma=0,2 f^{0,65665}$ , а во всех остальных случаях  $\gamma=0,2 f$ . Значения величин  $A_1$  и  $\alpha$  зависят от типа леса. Для обычного леса средних широт  $A_1=1,15$  и  $\alpha=0,43$ . Для тропического леса  $A_1=0,18$  и  $\alpha=0,752$ . Если  $d_{011} \neq 0$ , то положить  $A_{fi}=0$ .

5. Если  $d_{02o_f} = d_n$  и либо  $o_f > 1$ , либо одновременно  $o_f = 1$  и  $d_{011} \neq 0$ , т.е. электрический центр антенны приемника расположен ниже верхней кромки леса и не вся трасса проходит через лес, то вычислить длину последнего отрезка пути радиоволн от входа в лес до электрического центра антенны приемника  $d_{0o_f}$  в м и вычислить ослабление напряженности электромагнитного поля на этом отрезке леса в дБ по формуле

$$A_{fr} = A_m [1 - \exp(-d_{0o_f} \gamma / A_m)],$$

где все величины определяются так же, как на шаге 4. Если условие шага 5 не выполняется, то положить  $A_{fr}=0$ .

6. Если  $A_{fr} \neq 0$ , то удалить первый отрезок из массива отрезков пути радиоволн, проходящих через лес, сформированного на шаге 3. Если  $A_{fr} \neq 0$ , то удалить последний отрезок из массива отрезков пути радиоволн, проходящих через лес. Если в результате в массиве не осталось отрезков, то положить  $L_f = A_{fi} + A_{fr}$  и закончить работу.

7. Вычислить величину  $d$ , равную сумме длин оставшихся отрезков пути радиоволн, проходящих через лес, в м. Вычислить максимальное ослабление напряженности электромагнитного поля на оставшихся отрезках леса в дБ по формуле  $A_{f \max} = d \gamma$ , где величина  $\gamma$  определяется так же, как на шаге 4.

8. Если  $A_{fi} \neq 0$ , то удалить из массива описаний участков леса  $(d_{f1i}, d_{f2i}), i = \overline{1, n_f}$ , описания всех участков, для которых выполняется условие  $d_{f2i} \leq d_{021}$ . Если для первого из оставшихся участков леса выполняется условие  $d_{f11} < d_{021}$ , то положить  $d_{f11} = d_{021}$ . Если  $A_{fr} \neq 0$ , то удалить из массива описаний участков леса описания всех участков, для которых выполняется условие  $d_{f1i} \geq d_{01o_f}$ . Если для последнего из оставшихся участков выполняется условие  $d_{f2n_f} > d_{01o_f}$ , то положить  $d_{f2n_f} = d_{01o_f}$ . Если в результате в массиве не осталось отрезков, то положить  $L_f = A_{fi} + A_{fr}$  и закончить работу.

9. На основе профиля рельефа местности на трассе  $(d_i, h_i), i = \overline{0, n}$ , и описания участков леса на трассе  $(d_{f1i}, d_{f2i}), i = \overline{1, n_f}$ , модифицированного на шаге 8, построить новый профиль рельефа местности на трассе, в который включить все начальные и конечные точки участков леса, не совпадающие с точками исходного профиля рельефа местности, и для всех точек, расположенных в лесу, высоту местности над уровнем моря увеличить на среднюю высоту деревьев.

10. Используя методы и алгоритмы моделирования дифракции радиоволн на препятствиях, описанные в работе [2], вычислить величину ослабления напряженности электромагнитного поля  $L_l$  за счет дифракции радиоволн на препятствиях, имеющих на трассе с учетом леса, которая не будет превышена в течение заданного процента времени  $T$ .

11. Если  $L_l - L_d \leq A_{f \max}$ , то вычислить ослабление напряженности электромагнитного поля при прохождении радиоволн через лес по формуле  $L_f = A_{fr} + A_{fr} + L_l - L_d$ , иначе — по формуле  $L_f = A_{fr} + A_{fr} + A_{f \max}$ .

### Программная реализация

Под руководством и при участии авторов разработан комплекс программ моделирования прохождения радиоволн через лес для диапазона частот от 30 МГц до 3 ГГц, представленный в виде DLL-библиотеки **forest.dll** и интерактивного исполняемого модуля **forest.exe**. Библиотека **forest.dll** содержит ряд функций, которые могут использоваться разработчиками автоматизированных систем планирования радиосвязи для определения вида трассы с учетом леса, числа препятствий на трассе и их характеристик с учетом леса, определения количества и координат точек преломления пути радиоволн с учетом леса, вычисления ослабления напряженности электромагнитного поля при прохождении радиоволн через лес, которое не будет превышено в течение заданного процента времени. Модуль **forest.exe** позволяет пользователю вычислять требуемые характеристики трассы распространения радиоволн с учетом леса в диалоговом режиме. Для работы библиотеки **forest.dll** и модуля **forest.exe** требуется наличие библиотеки **diffraction.dll**. Библиотека **forest.dll** и модуль **forest.exe** могут использоваться на Intel-совместимых компьютерах под управлением операционной системы Windows 2000 и выше.

Разработанный алгоритм и комплекс программ моделирования прохождения радиоволн через лес для диапазона частот от 30 МГц до 3 ГГц использовались в ряде проектов по разработке автоматизированных систем планирования радиосвязи, выполненных РУП "НИИ средств автоматизации" в 2003–2005 гг.

### Выводы

Задача вычисления величины ослабления напряженности электромагнитного поля при прохождении радиоволн через лес, имеющийся на трассе, которая не будет превышена в течение заданного процента времени, может быть решена с использованием разработанного алгоритма и расчетных формул, опубликованных в Рекомендации Международного союза электросвязи. Разработанный алгоритм и комплекс программ моделирования прохождения радиоволн через лес для диапазона частот от 30 МГц до 3 ГГц могут использоваться в автоматизированных системах планирования фиксированной и мобильной радиосвязи.

## MODELLING OF PASSAGE OF RADIO WAVES THROUGH THE FOREST

A.A. KARPUK, N.V. EVTININA

### Abstract

Algorithm and software for calculation of attenuation of electromagnetic field strength at passage of radio waves through the forest for a range of frequencies from 30 MHz up to 3 GHz is developed. Software is submitted as DLL-library and the interactive executed module. Algorithm and software can be used for modeling passage of radio waves through a forest in the automated systems of planning of a radio communication.

### Литература

1. Рекомендация МСЭ-R P.833-5. Ослабление сигналов растительностью (Вопрос МСЭ-R 202/3). 2005. 13 с.
2. Карпук А.А., Евтихина Н.В. // Докл. БГУИР. 2006. Т. 4, № 4. С. 42–52.