

УДК 621.391.812

## МЕТОД ОЦЕНКИ ВЕЛИЧИНЫ ЗАМИРАНИЙ РАДИОСИГНАЛА ИЗ-ЗА МНОГОЛУЧЕВОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН

А.А. КАРПУК, Н.В. ЕВТИХИНА

*НИИ средств автоматизации,  
пр. Независимости, 117, Минск, Беларусь, 220027*

*Поступила в редакцию 23 июня 2006*

Разработан метод, алгоритмы и комплекс программ для вычисления величины замираний радиосигнала из-за многолучевого распространения радиоволн, которая не будет превышена в среднем наихудшем месяце года в течение заданного процента времени. Комплекс программ представлен в виде DLL-библиотеки и интерактивного исполняемого модуля. Алгоритмы и программы могут использоваться в автоматизированных системах планирования радиосвязи.

*Ключевые слова:* многолучевое распространение радиоволн, замирания радиосигнала, планирование радиосвязи.

### Введение

Многолучевое распространение радиоволн возникает из-за преломления пути распространения радиоволн в неоднородных слоях атмосферы и из-за отражения радиоволн от гладкой земной поверхности и приводит к изменениям напряженности электромагнитного поля в точке приема радиосигнала, которые называют замираниями радиосигнала. Замирания делятся на быстрые и медленные. Быстрые замирания радиосигнала обусловлены сравнительно быстрыми изменениями свойств атмосферы, которые приводят к быстро изменяемому во времени наложению прямого и отраженных или только отраженных лучей в точке приема. Медленные замирания радиосигнала связаны со сравнительно медленным изменением параметров поглощения и рассеяния радиоволн в атмосфере, а также обусловлены неравномерностью земной поверхности. В Рекомендации ITU-R P.530-11 [1] описаны методы, позволяющие вычислить процент времени, в течение которого ослабление напряженности электромагнитного поля из-за многолучевого распространения радиоволн в среднем наихудшем месяце календарного года для любой части мира будет превышать заданную величину. Целью настоящей работы является разработка метода, алгоритмов и комплекса программ для вычисления величины ослабления напряженности электромагнитного поля из-за многолучевого распространения радиоволн на трассах прямой видимости, которая не будет превышена в среднем наихудшем месяце календарного года в течение заданного процента времени.

### Постановка задачи

Для заданной трассы распространения радиоволн с прямой видимостью вычислить величину ослабления напряженности электромагнитного поля из-за многолучевого распространения радиоволн  $M_T$  в дБ, которая не будет превышена в среднем наихудшем месяце кален-

дарного года 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. Считаются известными следующие величины:

вертикальный градиент коэффициента рефракции атмосферы в средней точке трассы распространения радиоволн для первых 65 м атмосферы над поверхностью Земли, не превышенный в течение 1% времени года,  $dN_1$  в N-units/км;

неравномерность высот местности в районе трассы распространения радиоволн  $S_\alpha$  в м;

высоты электрических центров антенн передатчика и приемника над поверхностью Земли  $h_t$  и  $h_r$  соответственно в м;

частота радиоволн  $f$  в ГГц.

Величину  $dN_1$  для любой точки Земли можно вычислить, используя метод, описанный в Рекомендации ITU-R P.453-9 [2]. Величина  $S_\alpha$  в Рекомендации ITU-R P.530-11 определяется как среднеквадратичное отклонение высот местности в пределах квадрата  $110 \text{ км} \times 110 \text{ км}$  с центром в средней точке трассы распространения радиоволн. Значение  $S_\alpha$  для конкретной трассы распространения радиоволн можно вычислить, используя матрицу высот местности с шагом 30 с. Если в результате вычислений будет получено  $S_\alpha < 1$ , то следует положить  $S_\alpha = 1$ .

### Метод и алгоритм решения задачи

Предположим сначала, что задана величина ослабления напряженности электромагнитного поля из-за многолучевого распространения радиоволн  $M_T$ , а требуется найти процент времени  $T$ , в течение которого ослабление напряженности электромагнитного поля из-за многолучевого распространения радиоволн будет превышать величину  $M_T$  в среднем наихудшем месяце календарного года. Алгоритм решения этой задачи на основе метода, описанного в Рекомендации ITU-R P.530-11, состоит из следующих шагов.

1. Вычислить геоклиматический фактор  $K$  для трассы распространения радиоволн по формуле

$$K = 10^{-3,9-0,003dN_1} S_\alpha^{-0,42}. \quad (1)$$

2. Вычислить угол наклона трассы распространения радиоволн  $|\varepsilon_p|$  в мрад по формуле

$$|\varepsilon_p| = 1000 |h_r - h_t| / d_n. \quad (2)$$

3. Вычислить коэффициент времени  $p_0$ , в течение которого будет наблюдаться ослабление напряженности электромагнитного поля по причине медленных замираний радиосигнала из-за многолучевого распространения радиоволн в среднем наихудшем месяце календарного года по формуле

$$p_0 = K d_n^{3,2} (1 + |\varepsilon_p|)^{-0,97} \times 10^{0,032f - 0,00085h_L - 9,6}, \quad (3)$$

где  $h_L = \min\{h_t, h_r\}$ . Значение  $p_0$  должно находиться в пределах  $0 < p_0 \leq 2000$ , если  $p_0 > 2000$ , то положить  $p_0 = 2000$ .

4. Вычислить максимальное значение ослабления напряженности электромагнитного поля  $A_t$  в дБ, до которого следует учитывать быстрые замирания радиосигнала из-за многолучевого распространения радиоволн, по эмпирической формуле:

$$A_t = 25 + 1,2 \log p_0. \quad (4)$$

5. Если  $M_T \geq A_t$ , то вычислить процент времени  $T$ , в течение которого ослабление напряженности электромагнитного поля из-за многолучевого распространения радиоволн будет превышать заданную величину  $M_T$  в дБ в среднем наихудшем месяце календарного года, по формуле

$$T = p_0 \times 10^{-M_T/10}. \quad (5)$$

Если  $T > 100$ , то положить  $T = 100$ .

6. Если  $M_T < A_t$ , то вычислить процент времени  $p_t$ , в течение которого ослабление напряженности электромагнитного поля по причине медленных замираний радиосигнала из-за многолучевого распространения радиоволн будет превышать величину  $A_t$  в дБ в среднем наихудшем месяце календарного года, по формуле

$$p_t = p_0 \times 10^{-A_t/10}. \quad (6)$$

Шаг 7. Вычислить величины:

$$q'_\alpha = -20 \log_{10} \left\{ -\ln \left[ (100 - p_t) / 100 \right] \right\} / A_t, \quad (7)$$

$$q_t = (q'_\alpha - 2) / \left[ (1 + 0,3 \times 10^{-A_t/20}) \times 10^{-0,016 A_t} \right] - 4,3 (10^{-A_t/20} + A_t / 800), \quad (8)$$

$$q_\alpha = 2 + \left[ 1 + 0,3 \times 10^{-A/20} \right] \left[ 10^{-0,016 A} \right] \left[ q_t + 4,3 (10^{-A/20} + A / 800) \right], \text{ где } A = M_T. \quad (9)$$

8. Вычислить процент времени  $T$ , в течение которого ослабление напряженности электромагнитного поля из-за многолучевого распространения радиоволн будет превышать заданную величину  $M_T$  в дБ в среднем наихудшем месяце календарного года, по формуле

$$T = 100 \left[ 1 - \exp \left( -10^{-q_\alpha M_T/20} \right) \right]. \quad (10)$$

Вернемся к решению исходной задачи. Очевидно, что если известна величина  $T$  и быстрые замирания радиосигнала из-за многолучевого распространения радиоволн не учитываются, то искомую величину  $M_T$  можно легко найти из уравнения (5). Если учитываются быстрые замирания радиосигнала, то величины  $T$  и  $M_T$  связаны уравнением (10), в котором величина  $q_\alpha$  есть функция от  $M_T$ . В отличие от уравнения (5), из уравнения (10) нельзя получить аналитическое выражение для вычисления величины  $M_T$ , однако уравнение (10) можно решить методом итераций. На основе приведенных рассуждений можно построить алгоритм вычисления величины ослабления напряженности электромагнитного поля из-за многолучевого распространения радиоволн  $M_T$  в дБ, которая не будет превышена в среднем наихудшем месяце календарного года в течение заданного процента времени  $T$ , состоящий из следующих шагов.

1. Вычислить величины  $K$ ,  $|\varepsilon_p|$ ,  $p_0$  и  $A_t$  по формулам (1)–(4) соответственно.

2. Вычислить величину ослабления напряженности электромагнитного поля по причине медленных замираний радиосигнала из-за многолучевого распространения радиоволн  $A$  в дБ,

которая не будет превышена в среднем наихудшем месяце календарного года в течение заданного процента времени  $T$ , по формуле

$$A = 10 \log [p_0 / (100 - T)]. \quad (11)$$

3. Если  $A \geq A_t$ , то положить  $M_T = A$  и закончить работу.

4. Если  $A < A_t$ , то вычислить величины  $p_t$ ,  $q'_\alpha$  и  $q_t$  по формулам (6), (7) и (8) соответственно.

5. Найти значение  $A$ , являющееся корнем уравнения

$$100 \exp(-10^{-q_\alpha A/20}) = T, \quad (12)$$

где величина  $q_\alpha$  является функцией от  $A$  и вычисляется по формуле (9). Для решения уравнения (12) применим итерационный процесс, определяемый по формуле

$$A_{n+1} = A_n - \frac{A_n(2 + b_1 \times 10^{-0,016A_n} + 1,29 \times 10^{-0,116A_n} + b_2 \times 10^{-0,066A_n}) - S}{2 + a_1 b_1 + a_2 b_2 + 1,29 a_3 + (q_t + 0,01075 A_n) \times 10^{-0,016A_n} + 1,29 \times 10^{-0,116A_n} + (4,3 + 0,3 q_t + 0,0003225 A_n) \times 10^{-0,066A_n}},$$

где

$$a_1 = -0,016 A_n \ln 10 \times 10^{-0,016 A_n};$$

$$a_2 = -0,066 A_n \ln 10 \times 10^{-0,066 A_n};$$

$$a_3 = -0,116 A_n \ln 10 \times 10^{-0,116 A_n};$$

$$b_1 = q_t + 0,005375 A_n;$$

$$b_2 = 4,3 + 0,3 q_t + 0,00016125 A_n;$$

$$S = -20 \log_{10} [\ln(100/T)].$$

В качестве начального значения  $A_0$  можно использовать значение  $A$ , вычисленное на шаге 2 по формуле (11). Итерационный процесс продолжается до тех пор, пока не будет достигнута требуемая точность вычислений, например, пока выполняется условие  $|A_{n+1} - A_n| \geq 0,1$ . После окончания итерационного процесса положить  $M_T = A_{n+1}$  и закончить работу.

### Программная реализация

Под руководством и при участии авторов разработан комплекс программ вычисления характеристик многолучевого распространения радиоволн на трассах прямой видимости, представленный в виде DLL-библиотеки **multipath.dll** и интерактивного исполняемого модуля **multipath.exe**. Библиотека **multipath.dll** содержит ряд функций, которые могут использоваться разработчиками автоматизированных систем планирования радиосвязи для вычисления неравномерности высот местности и геоклиматического фактора на трассе распространения радиоволн; вычисления процента времени, в течение которого ослабление напряженности электромагнитного поля из-за многолучевого распространения радиоволн в среднем наихудшем месяце календарного года будет превышать заданную величину; вычисления величины ослабления напряженности электромагнитного поля из-за многолучевого распространения радиоволн, которая не будет превышена в среднем наихудшем месяце календарного года в течение заданного

процента времени. Модуль **multipath.exe** позволяет пользователю вычислять требуемые характеристики многолучевого распространения радиоволн в диалоговом режиме. Библиотека **multipath.dll** и модуль **multipath.exe** могут использоваться на Intel-совместимых компьютерах под управлением операционной системы Windows 2000 и выше.

Разработанные алгоритмы и комплекс программ вычисления характеристик многолучевого распространения радиоволн на трассах прямой видимости использовались в ряде проектов по разработке автоматизированных систем планирования радиосвязи, выполненных НИИ средств автоматизации в 2003–2005 гг.

### **Выводы**

Задача вычисления величины замираний радиосигнала из-за многолучевого распространения радиоволн, которая не будет превышена в среднем наихудшем месяце года в течение заданного процента времени, может быть решена с использованием разработанных методов, алгоритмов и расчетных формул, опубликованных в Рекомендациях Международного союза электросвязи. Разработанные методы, алгоритмы и комплекс программ могут использоваться в автоматизированных системах планирования фиксированной радиосвязи.

## **METHOD OF THE RATING OF SIZE OF FADING DUE TO MULTIPATH BEAM SPREADING**

A.A. KARPUK, N.V. EVTININA

### **Abstract**

Method, algorithms and software for calculation of size of fading due to multipath beam spreading, which will not be exceeded during the set percent of time on the average the worse month of year is developed. Software is submitted as DLL-library and the interactive executed module. Algorithms and software can be used in the automated systems of planning of a radio communication.

### **Литература**

1. Рекомендация МСЭ-R P.530-11. Данные о распространении радиоволн и методы прогнозирования, требующиеся для проектирования наземных систем прямой видимости. [Электронный ресурс] / МСЭ. 2005. 50 с. Режим доступа: <http://www.itu.int/rec/R-REC-P.530-11-200503-S/en>.
2. Recommendation ITU-R P.453-9. The radio refractive index: its formula and refractivity data. [Electronic resource] / ITU. 2003. 27 p. Mode of access: <http://www.itu.int/rec/R-REC-P.453-9-200304-I/en>.