

УДК 621.391.812

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИФРАКЦИИ РАДИОВОЛН НА ПРЕПЯТСТВИЯХ**

А.А. КАРПУК, Н.В. ЕВТИХИНА

*РУП "НИИ средств автоматизации"  
пр. Независимости, 117, Минск, 220027, Беларусь**Поступила в редакцию 19 июля 2006*

Разработаны методы, алгоритмы и комплекс программ для определения вида трассы распространения радиоволн, поиска препятствий на трассе и вычисления их характеристик, определения количества и координат точек преломления пути радиоволн, вычисления ослабления напряженности электромагнитного поля при дифракции радиоволн на препятствиях. Комплекс программ представлен в виде DLL-библиотеки и интерактивного исполняемого модуля. Алгоритмы и программы могут использоваться для моделирования дифракции радиоволн на препятствиях в автоматизированных системах планирования радиосвязи.

*Ключевые слова:* распространение радиоволн, дифракция радиоволн на препятствиях, планирование радиосвязи.

**Введение**

Дифракция радиоволн на препятствиях является одним из основных механизмов распространения радиоволн на наземных трассах. Теория дифракции радиоволн рассматривалась во многих источниках, например в [1]. Расчетные формулы для вычисления ослабления напряженности электромагнитного поля при дифракции радиоволн на препятствиях различных типов приведены в Рекомендации Международного союза электросвязи ITU-R P.526-9 [2]. Однако Рекомендация ITU-R P.526-9 не содержит методов и алгоритмов поиска и классификации препятствий на трассах распространения радиоволн, что затрудняет ее практическое применение. Целью настоящей работы является разработка методов и алгоритмов поиска и классификации дифракционных препятствий на трассах распространения радиоволн и разработка на их основе и на основе Рекомендации ITU-R P.526-9 алгоритмов и комплекса программ для вычисления ослабления напряженности электромагнитного поля за счет дифракции радиоволн на препятствиях.

**Постановка задачи**

Для заданной трассы распространения радиоволн вычислить величину ослабления напряженности электромагнитного поля  $L_d$  в децибелах за счет дифракции радиоволн на препятствиях, имеющих 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. Профиль рельефа местности можно постро-

ить по линиям равных высот электронной карты местности или вычислить с использованием электронной матрицы высот местности. Считаются известными следующие величины: высоты электрических центров антенн передатчика и приемника над поверхностью Земли  $h_t$  и  $h_r$ , соответственно в метрах; частота радиоволн  $f$  в гигагерцах; значение эффективного радиуса Земли для трассы  $a_e$  в километрах, которое будет превышено в течение 50% времени; значение эффективного радиуса Земли для трассы  $R_e$  в километрах, которое будет превышено в течение процента времени  $T$ . Величины  $a_e$  и  $R_e$  для любого района Земли можно вычислить, используя Рекомендации ITU-R P.834-5 [3] и ITU-R P.453-9 [4].

### Определение вида трассы

Трассы распространения радиоволн делятся на трассы прямой видимости (line-of-sight) и загоризонтные трассы (trans-horizon). Трассы прямой видимости могут быть открытыми со свободной первой зоной Френеля (line-of-sight with first Fresnel zone clearance) и с дифракцией радиоволн на трассе, вызванной перекрытием первой зоны Френеля элементами местности (line-of-sight with sub-path diffraction). Для открытых трасс прямой видимости со свободной первой зоной Френеля  $L_d=0$ . На загоризонтных трассах всегда имеет место дифракция радиоволн на трассе. Алгоритм определения вида трассы, разработанный на основе Рекомендации ITU-R P.452-12 [5], состоит из следующих шагов.

1. Для точек профиля рельефа местности на трассе с индексами  $i = \overline{1, n-1}$  вычислить углы возвышения местности  $\theta_i$  в мрад по формуле

$$\theta_i = \frac{h_i - h_{ts}}{0,001d_i} - \frac{d_i}{2a_e}, \text{ где } h_{ts} = h_0 + h_t.$$

2. Найти  $\theta_{max} = \max_{i=1}^{n-1} (\theta_i)$  и вычислить угол возвышения для электрического центра антенны приемника  $\theta_n$  в мрад по формуле

$$\theta_n = \frac{h_{rs} - h_{ts}}{0,001d_n} - \frac{d_n}{2a_e}, \text{ где } h_{rs} = h_n + h_r.$$

3. Если  $\theta_{max} > \theta_n$ , то трасса загоризонтная, иначе это трасса прямой видимости, для дальнейшей классификации которой следует выполнять шаги, начиная с шага 4.

4. Для точек профиля рельефа местности на трассе с индексами  $i = \overline{1, n-1}$  вычислить радиусы первого эллипсоида Френеля  $R_i$  в метрах по формуле

$$R_i = 0,55 \sqrt{\frac{d_i(d_n - d_i)}{d_n f}}.$$

5. Для точек профиля рельефа местности на трассе с индексами  $i = \overline{1, n-1}$  вычислить углы возвышения местности с учетом радиусов первого эллипсоида Френеля  $\theta_{fi}$  в мрад по формуле:

$$\theta_{fi} = \frac{(h_i + R_i) - h_{ts}}{0,001d_i} - \frac{d_i}{2R_e}.$$

6. Найти  $\theta_{fmax} = \max_{i=1}^{n-1} (\theta_{fi})$ .

7. Если  $\theta_{fmax} > \theta_n$ , то это трасса прямой видимости с дифракцией радиоволн, вызванной перекрытием первой зоны Френеля элементами местности, иначе это открытая трасса прямой видимости со свободной первой зоной Френеля.

### Классификация трасс

Трассы с дифракцией радиоволн классифицируются на трассы с одним остроконечным препятствием (single knife-edge obstacle); трассы с двумя остроконечными изолированными препятствиями (double isolated edges); трассы с одним цилиндрическим препятствием (single rounded obstacle); трассы с дифракцией на нерегулярном ландшафте (irregular terrain). Авторами разработан алгоритм поиска дифракционных препятствий и классификации трасс, состоящий из следующих шагов.

1. Для точек профиля рельефа местности на трассе с индексами  $i = \overline{1, n-1}$  вычислить углы возвышения местности от передатчика  $\theta_i$  в мрад по формуле

$$\theta_i = \frac{h_i - h_{ts}}{0,001d_i} - \frac{d_i}{2R_e}, \text{ где } h_{ts} = h_0 + h_1.$$

2. Для точек профиля рельефа местности на трассе с индексами  $j = n-1, n-2, \dots, 1$  вычислить углы возвышения местности от приемника  $\psi_j$  в мрад по формуле

$$\psi_j = \frac{h_j - h_{rs}}{0,001(d_n - d_j)} - \frac{d_n - d_j}{2R_e}, \text{ где } h_{rs} = h_n + h_r.$$

Точку профиля рельефа местности с индексом  $i \in \overline{2, n-2}$  назовем  $t$ -пиком, если для всех  $i = \overline{1, i-1}$  выполняется условие:

$$\frac{(h_i + R_i) - h_{ts}}{d_i} - \frac{10^3 d_i}{2R_e} \leq \theta_i, \text{ где } R_i = 0,55 \sqrt{\frac{d_i(d_i - d_i)}{fd_i}}.$$

Точку профиля рельефа местности с индексом  $j \in n-2, n-3, \dots, 2$  назовем  $r$ -пиком, если для всех  $j = n-1, n-2, \dots, j_r+1$  выполняется условие

$$\frac{(h_j + R_j) - h_{rs}}{0,001(d_n - d_j)} - \frac{d_n - d_j}{2R_e} \leq \psi_j, \text{ где } R_j = 0,55 \sqrt{\frac{(d_n - d_j)(d_j - d_{j_r})}{f(d_n - d_{j_r})}}.$$

Нетрудно убедиться, что если трасса распространения радиоволн имеет  $t$   $t$ -пиков с индексами  $i_1 < i_2 < \dots < i_t$  и  $r$   $r$ -пиков с индексами  $j_1 > j_2 > \dots > j_r$ , то  $i_t < j_r$ .

3. Найти на трассе распространения радиоволн  $t$ -пик с максимальным индексом  $i_t$ . Если  $t$ -пиков на трассе нет, то классифицировать ее как трассу с дифракцией на нерегулярном ландшафте.

4. Найти на трассе распространения радиоволн  $r$ -пик с минимальным индексом  $j_r$ . Если  $r$ -пиков на трассе нет, то классифицировать ее как трассу с дифракцией на нерегулярном ландшафте.

5. Если  $i_t = j_r$ , то это трасса с одним остроконечным препятствием, вершина которого находится в точке профиля рельефа местности с индексом  $i_t$ . Если  $i_t = j_r - 1$  и одновременно  $\theta_{i_t} > 0$ ,  $\psi_{j_r} > 0$ ,  $\theta_{i_t} > \theta_{j_r}$  и  $\psi_{j_r} > \psi_{i_t}$  то это трасса с одним цилиндрическим препятствием,

которое расположено между точками рельефа местности с индексами  $i$  и  $j_r$ . Если не выполняется хотя бы одно из четырех последних условий, то это трасса с дифракцией на нерегулярном ландшафте. Если  $i \neq j_r - 1$ , то перейти к шагу 6.

6. Для точек профиля рельефа местности на трассе с индексами  $i = \overline{i_t + 1}, j_r - 1$  вычислить углы возвышения местности с учетом радиусов первого эллипсоида Френеля  $\theta_{fi}$  в градусах относительно точки с индексом  $i$  по формуле

$$\theta_{fi} = \frac{(h_i + R_i) - h_i}{0,001(d_i - d_i)} - \frac{d_i - d_i}{2 R_e}, \text{ где } R_i = 0,55 \sqrt{\frac{(d_i - d_i)(d_{j_r} - d_i)}{f(d_{j_r} - d_i)}}.$$

Вычислить угол возвышения местности для точки трассы с индексом  $j_r$  относительно точки трассы с индексом  $i$  по формуле

$$\bar{\theta}_{j_r} = \frac{h_{j_r} - h_i}{0,001(d_{j_r} - d_i)} - \frac{d_{j_r} - d_i}{2 R_e}.$$

Если для всех точек профиля рельефа местности на трассе с индексами  $i = \overline{i_t + 1}, j_r - 1$  выполняется условие  $\theta_{fi} \leq \bar{\theta}_{j_r}$ , то это трасса с двумя остроконечными изолированными препятствиями, вершины которых находятся в точках профиля рельефа местности с индексами  $i$  и  $j_r$ . Если хотя бы для одной точки указанное условие не выполняется и  $\theta_{fi} \leq 0$  или  $\psi_{j_r} \leq 0$ , то это трасса с дифракцией на нерегулярном ландшафте. Если одновременно  $\theta_{fi} > 0$  и  $\psi_{j_r} > 0$ , то перейти к шагу 7.

7. Если для всех точек профиля рельефа местности на трассе с индексами  $i = \overline{i_t + 1}, j_r - 1$  выполняется условие  $\theta_{fi} > \bar{\theta}_{j_r}$  и для всех точек профиля рельефа местности на трассе с индексами  $i = \overline{i_t + 1}, j_r - 1$  выполняется условие  $\psi_{j_r} > \psi_i$ , то это трасса с одним цилиндрическим препятствием, которое расположено между точками рельефа местности с индексами  $i$  и  $j_r$ . Если хотя бы одно из этих условий не выполняется, то рассматриваемая трасса есть трасса с дифракцией на нерегулярном ландшафте.

### Дифракция радиоволн на остроконечных препятствиях

В дальнейших рассуждениях используется профиль рельефа местности на трассе распространения радиоволн  $(d_i, H_i), i = 0, n$ , пересчитанный с учетом кривизны Земли. При пересчете используется расчетное значение эффективного радиуса Земли для трассы  $R_e$  в километрах. Пересчет профиля рельефа местности производится по формуле

$$H_i = h_i + \frac{0,001 d_i (d_n - d_i)}{2 R_e}.$$

Если трасса распространения радиоволн имеет одно остроконечное препятствие, вершина которого находится в точке профиля рельефа местности с индексом  $i_t$ , то алгоритм вычисления ослабления напряженности электромагнитного поля за счет дифракции радиоволн на одном остроконечном препятствии, разработанный на основе Рекомендации ИТУ-R P.526-9 [2], состоит из следующих шагов.

1. Вычислить высоту препятствия относительно линии, соединяющей электрические центры антенн передатчика и приемника, по формуле

$$\hat{h}_i = H_i - \left( h_{ts} + \frac{d_i (h_{rs} - h_{ts})}{d_n} \right).$$

2. Вычислить расстояния от электрического центра антенны передатчика до вершины препятствия и от электрического центра антенны приемника до вершины препятствия в метрах по формулам:  $d_{ii} = \sqrt{d_i^2 + (H_i - h_{ts})^2}$ ,  $d_{ri} = \sqrt{(d_n - d_i)^2 + (H_i - h_{rs})^2}$ .

3. Вычислить значение безразмерного параметра  $v$  по формуле

$$v = 2,582 \hat{h}_i \sqrt{f \left( \frac{1}{d_{ii}} + \frac{1}{d_{ri}} \right)}, \text{ если } v < -0,78, \text{ то положить } v = -0,78.$$

5. Вычислить ослабление напряженности электромагнитного поля в децибелах, вызванное наличием на трассе распространения радиоволн одного остроконечного препятствия, по формуле

$$L(v) = 6,9 + 20 \log \left( \sqrt{(v - 0,1)^2 + 1} + v - 0,1 \right).$$

6. Вычислить ослабление напряженности электромагнитного поля за счет дифракции радиоволн на одном остроконечном препятствии в децибелах по формуле  $L_d = 20 \log(d_{ii} + d_{ri}) - 20 \log d_n + L(v)$ .

Если трасса распространения радиоволн имеет два остроконечных препятствия, вершины которых находятся в точках профиля рельефа местности с индексами  $i$  и  $j$ ,  $i < j$ , то алгоритм вычисления ослабления напряженности электромагнитного поля за счет дифракции радиоволн на двух остроконечных препятствиях, разработанный на основе Рекомендации ИТУ-R P.526-9 [2], состоит из следующих шагов.

1. Вычислить расстояния в метрах от электрического центра антенны передатчика до вершины первого препятствия, от вершины первого препятствия до вершины второго препятствия и от электрического центра антенны приемника до вершины второго препятствия по формулам

$$d_{ii} = \sqrt{d_i^2 + (H_i - h_{ts})^2}, \quad d_{ij} = \sqrt{(d_{jr} - d_i)^2 + (H_j - H_i)^2}, \quad d_{rj} = \sqrt{(d_n - d_j)^2 + (H_j - h_{rs})^2}.$$

2. Вычислить превышение  $\hat{h}_i$  в метрах вершины первого препятствия над линией, соединяющей электрический центр антенны передатчика и вершину второго препятствия, и превышение  $\hat{h}_j$  в метрах вершины второго препятствия над линией, соединяющей электрический центр антенны приемника и вершину первого препятствия, по формулам

$$\hat{h}_i = H_i - \left( h_{ts} + \frac{d_i (H_j - h_{ts})}{d_j} \right), \quad \hat{h}_j = H_j - \left( H_i + \frac{(d_{jr} - d_i)(h_{rs} - H_j)}{d_n - d_i} \right).$$

3. Вычислить значения безразмерных параметров  $v_1$  и  $v_2$  по формулам

$$v_1 = 2,582 \hat{h}_i \sqrt{f \left( \frac{1}{d_{ii}} + \frac{1}{d_{ij}} \right)}, \quad v_2 = 2,582 \hat{h}_j \sqrt{f \left( \frac{1}{d_{ij}} + \frac{1}{d_{rj}} \right)}.$$

Если  $v_1 < -0,78$ , то положить  $v_1 = -0,78$ , если  $v_2 < -0,78$ , то положить  $v_2 = -0,78$ .

4. По формуле шага 5 для одного остроконечного препятствия вычислить ослабления напряженности электромагнитного поля  $L(v_1)$  и  $L(v_2)$ , вызванные наличием на трассе распространения радиоволн каждого из остроконечных препятствий.

5. Если  $|L(v_1) - L(v_2)| > 10$ , то перейти к шагу 7, иначе вычислить дополнительное ослабление напряженности электромагнитного поля  $L_c$  по формуле

$$L_c = 10 \log \left[ \frac{d_{j_r} (d_n - d_{i_i})}{d_n (d_{j_r} - d_{i_i})} \right].$$

6. Вычислить ослабление напряженности электромагнитного поля за счет дифракции радиоволн на двух остроконечных препятствиях в децибелах по формуле  $L_d = 20 \log(d_{i_i} + d_{i_j} + d_{r_j}) - 20 \log d_n + L(v_1) + L(v_2) + L_c$  и закончить работу.

7. Вычислить превышения вершин препятствий над линией, соединяющей электрические центры антенн передатчика и приемника,  $\bar{h}_i$  и  $\bar{h}_j$  в метрах по формулам

$$\bar{h}_i = H_i - \left( h_{rs} + \frac{d_{i_i} (h_{rs} - h_{ts})}{d_n} \right), \quad \bar{h}_j = H_j - \left( h_{ts} + \frac{d_{j_r} (h_{rs} - h_{ts})}{d_n} \right).$$

8. Если  $L(v_1) > L(v_2)$ , т.е. первое препятствие является преобладающим, то вычислить расстояние  $d_{r_i}$  в метрах от электрического центра антенны приемника до вершины первого препятствия по формуле  $d_{r_i} = \sqrt{(d_n - d_{i_i})^2 + (H_i - h_{rs})^2}$  и вычислить значение безразмерного параметра  $v_1$  по формуле

$$v_1 = 2,582 \bar{h}_i \sqrt{f \left( \frac{1}{d_{i_i}} + \frac{1}{d_{r_i}} \right)}.$$

Если  $v_1 < -0,78$ , то положить  $v_1 = -0,78$ . По формуле шага 5 для одного остроконечного препятствия вычислить ослабление напряженности электромагнитного поля  $L(v_1)$ , вызванное наличием на трассе распространения радиоволн первого преобладающего остроконечного препятствия. Перейти к шагу 10.

9. Если  $L(v_1) < L(v_2)$ , т.е. второе препятствие является преобладающим, то вычислить расстояние  $d_{i_j}$  в метрах от электрического центра антенны передатчика до вершины второго препятствия по формуле  $d_{i_j} = \sqrt{(d_{j_r})^2 + (H_j - h_{ts})^2}$  и вычислить значение безразмерного параметра  $v_2$  по формуле

$$v_2 = 2,582 \bar{h}_j \sqrt{f \left( \frac{1}{d_{i_j}} + \frac{1}{d_{r_j}} \right)}.$$

Если  $v_2 < -0,78$ , то положить  $v_2 = -0,78$ . По формуле шага 5 для одного остроконечного препятствия вычислить ослабление напряженности электромагнитного поля  $L(v_2)$ , вызванное наличием на трассе распространения радиоволн второго преобладающего остроконечного препятствия.

10. Вычислить дополнительную поправку к ослаблению напряженности электромагнитного поля  $T_c$  по формуле

$$T_c = \left[ 12 - 20 \log \left( \frac{2}{1 - \frac{a}{\pi}} \right) \right] Q, \text{ где}$$

$$p = \left[ \frac{f}{0,15 d_i (d_n - d_i)} \right]^{1/2} \bar{h}_i, q = \left[ \frac{f}{0,15 d_j (d_n - d_j)} \right]^{1/2} \bar{h}_j, \alpha = \arctg \left[ \frac{d_n (d_j - d_i)}{d_i (d_n - d_j)} \right]^{1/2},$$

$$Q = \left( \frac{q}{p} \right)^{2p}, \text{ если первое препятствие является преобладающим, и } Q = \left( \frac{p}{q} \right)^{2q}, \text{ если второе}$$

препятствие является преобладающим. Если первое препятствие является преобладающим и  $q > p$ , то положить  $T_c = 0$ . Если второе препятствие является преобладающим и  $p > q$ , то положить  $T_c = 0$ .

11. Вычислить ослабление напряженности электромагнитного поля за счет дифракции радиоволн на двух остrokонечных препятствиях в децибелах по формуле  $L_d = 20 \log(d_{i_i} + d_{i_j} + d_{r_j}) - 20 \log d_n + L(v_1) + L(v_2) - T_c$ .

### Дифракция радиоволн на цилиндрическом препятствии

Если трасса распространения радиоволн имеет одно цилиндрическое препятствие, которое расположено между точками рельефа местности с индексами  $i_t$  и  $j_r$ ,  $i_t < j_r$ , то алгоритм вычисления ослабления напряженности электромагнитного поля за счет дифракции радиоволн на цилиндрическом препятствии, разработанный на основе Рекомендации ITU-R P.526-9 [2], состоит из следующих шагов.

1. Вычислить координаты (расстояние от передатчика по линии большого круга  $d_c$  в километрах и высоту  $h_c$  в метрах) точки пересечения прямой линии, соединяющей электрический центр антенны передатчика с точкой рельефа местности с индексом  $i_t$ , с прямой линией, соединяющей электрический центр антенны приемника с точкой рельефа местности с индексом  $j_r$ , по формулам

$$d_c = d_i \left[ \frac{d_n (H_{j_r} - h_{rs}) + (d_n - d_{j_r})(h_{rs} - h_{ts})}{(d_n - d_{j_r})(H_{i_t} - h_{ts}) + d_i (H_{j_r} - h_{rs})} \right], h_c = h_{ts} + (H_{i_t} - h_{ts}) \frac{d_c}{d_i}.$$

2. Вычислить высоту точки пересечения указанных в шаге 1 линий относительно линии, соединяющей электрические центры антенн передатчика и приемника, в метрах по формуле

$$\hat{h}_c = h_c - \left( h_{ts} + \frac{d_c (h_{rs} - h_{ts})}{d_n} \right).$$

3. Вычислить расстояния от точки пересечения указанных в шаге 1 линий до электрического центра антенны передатчика и электрического центра антенны приемника в метрах по формулам

$$d_{tc} = \sqrt{d_c^2 + (h_c - h_{ts})^2}, d_{rc} = \sqrt{(d_n - d_c)^2 + (h_c - h_{rs})^2}.$$

4. Вычислить расстояние  $d_{i,j_r}$  между точками профиля рельефа местности с индексами  $i_i$  и  $j_r$  в метрах по формуле  $d_{i,j_r} = \sqrt{(d_{j_r} - d_{i_i})^2 + (H_{j_r} - H_{i_i})^2}$ .

5. Найти точку профиля рельефа местности с индексом  $i_c \in \overline{i_i, j_r}$  такую, что для всех  $i \in \overline{i_i, j_r}$  выполняется условие  $H_{i_c} \geq H_i$ . Если таких точек более одной, то выбрать ту из них, для которой величина  $d_c - d_{i_c}$  является минимальной.

6. Если  $i_c = i_i$  или  $i_c = j_r$ , то положить  $\Delta = 1$  и  $\chi = 0$ , иначе вычислить эти величины по формулам

$$\Delta = H_{i_c} - \left( H_{i_i} + \frac{(d_{i_c} - d_{i_i})(H_{j_r} - H_{i_i})}{d_{j_r} - d_{i_i}} \right), \chi = d_c - d_{i_c}.$$

7. Вычислить радиус цилиндрического препятствия  $R$  в метрах по формуле

$$R = \frac{1}{2} \sqrt{(d_{i,j_r})^2 + \frac{1}{\Delta^2} \left[ \frac{(d_{i,j_r})^2}{4} - \Delta^2 - \chi^2 \right]^2}.$$

8. Вычислить значение безразмерного параметра  $\nu$  по формуле

$$\nu = 2,582 \hat{h}_c \sqrt{f \left( \frac{1}{d_{i_c}} + \frac{1}{d_{r_c}} \right)}, \text{ если } \nu < -0,78, \text{ то положить } \nu = -0,78.$$

9. По формуле шага 5 для одного остроконечного препятствия вычислить ослабление напряженности электромагнитного поля  $L(\nu)$  на остроконечном препятствии, эквивалентном рассматриваемому цилиндрическому препятствию.

10. Вычислить дополнительное ослабление напряженности электромагнитного поля  $T(\mu, \varphi)$ , вызванное искривлением цилиндрического препятствия, по формуле

$$T(\mu, \varphi) = k\mu^b, \text{ где } k = 8,2 + 12\varphi, b = 0,73 + 0,27[1 - \exp(-1,43\varphi)],$$

$$\mu = R \left[ \frac{d_{i_c} + d_{r_c}}{d_{i_c} d_{r_c}} \right] / \left[ \frac{\pi f R}{0,3} \right]^{1/3}, \varphi = \hat{h}_c \left[ \frac{\pi f R}{0,3} \right]^{2/3} / R.$$

Здесь, как и ранее, через  $f$  обозначена частота радиоволн в гигагерцах.

11. Вычислить ослабление напряженности электромагнитного поля за счет дифракции радиоволн на цилиндрическом препятствии в децибелах по формуле  $L_d = 20 \log(d_{i_c} + d_{r_c}) - 20 \log d_n + L(\nu) + T(\mu, \varphi)$ .

### Дифракция радиоволн на нерегулярном ландшафте

Если трасса распространения радиоволн классифицирована как трасса с дифракцией на нерегулярном ландшафте, то алгоритм вычисления ослабления напряженности электромагнитного поля за счет дифракции радиоволн на нерегулярном ландшафте, разработанный на основе Рекомендации ITU-R P.526-9 [2], состоит из следующих шагов.

1. Для точек профиля рельефа местности на трассе с индексами  $i = \overline{1, n-1}$  вычислить значения параметров  $\hat{h}_i$  и  $\nu_i$  по формулам

$$\hat{h}_i = H_i - \left( h_{ts} + \frac{d_i(h_{rs} - h_{ts})}{d_n} \right), \quad v_i = 2,582\hat{h}_i \sqrt{f \left( \frac{1}{d_i} + \frac{1}{d_n - d_i} \right)}.$$

2. Найти индекс  $p \in \overline{1, n-1}$  такой, что для всех  $i = \overline{1, n-1}$  выполняется условие  $v_p \geq v_i$ . Если таких индексов несколько, то в качестве  $p$  взять минимальный из них.

3. Если  $v_p \leq -0,78$ , то ослабление напряженности электромагнитного поля за счет дифракции на нерегулярном ландшафте  $L = 0$ , и закончить работу. Если  $v_p > -0,78$ , то вычислить ослабление напряженности электромагнитного поля  $L(v_p)$  по формуле шага 5 для одного остроконечного препятствия и перейти к шагу 4.

4. Если  $p = 1$ , то перейти к шагу 6, иначе для точек профиля рельефа местности на трассе с индексами  $i = \overline{1, p-1}$  вычислить значения параметров  $\hat{h}_i$  и  $v_i$  по формулам

$$\hat{h}_i = H_i - \left( h_{ts} + \frac{d_i(H_p - h_{ts})}{d_p} \right), \quad v_i = 2,582\hat{h}_i \sqrt{f \left( \frac{1}{d_i} + \frac{1}{d_p - d_i} \right)}.$$

5. Найти индекс  $t \in \overline{1, p-1}$  такой, что для всех  $i = \overline{1, p-1}$  выполняется условие  $v_t \geq v_i$ . Если таких индексов несколько, то в качестве  $t$  взять минимальный из них.

6. Если  $p = 1$  или  $v_t \leq -0,78$ , то положить  $L(v_t) = 0$  и вычислить расстояние, проходимое радиоволной от электрического центра антенны передатчика до точки профиля рельефа местности с индексом  $p$ , в метрах по формуле  $d_{tp} = \sqrt{d_p^2 + (H_p - h_{ts})^2}$ . Если  $v_t > -0,78$ , то вычислить ослабление напряженности электромагнитного поля  $L(v_t)$  по формуле шага 5 для одного остроконечного препятствия и вычислить расстояние, проходимое радиоволной от электрического центра антенны передатчика до точки профиля рельефа местности с индексом  $p$ , в метрах по формуле

$$d_{tp} = \sqrt{d_t^2 + (H_t - h_{ts})^2} + \sqrt{(d_p - d_t)^2 + (H_p - H_t)^2}.$$

7. Если  $p = n-1$ , то перейти к шагу 9, иначе для точек профиля рельефа местности на трассе с индексами  $i = \overline{p+1, n-1}$  вычислить значения параметров  $\hat{h}_i$  и  $v_i$  по формулам

$$\hat{h}_i = H_i - \left( H_p + \frac{(d_i - d_p)(h_{rs} - H_p)}{d_n - d_p} \right), \quad v_i = 2,582\hat{h}_i \sqrt{f \left( \frac{1}{d_i - d_p} + \frac{1}{d_n - d_i} \right)}.$$

8. Найти индекс  $r \in \overline{p+1, n-1}$  такой, что для всех  $i = \overline{p+1, n-1}$  выполняется условие  $v_r \geq v_i$ . Если таких индексов несколько, то в качестве  $r$  взять максимальный из них.

9. Если  $p = n-1$  или  $v_r \leq -0,78$ , то положить  $L(v_r) = 0$  и вычислить расстояние, проходимое радиоволной от точки профиля рельефа местности с индексом  $p$  до электрического центра антенны приемника, в метрах по формуле  $d_{rp} = \sqrt{(d_n - d_p)^2 + (h_{rs} - H_p)^2}$ . Если  $v_r > -0,78$ , то вычислить ослабление напряженности электромагнитного поля  $L(v_r)$  по формуле шага 5 для одного остроконечного препятствия и вычислить расстояние, проходимое радиоволной от точки профиля рельефа местности с индексом  $p$ , в метрах до электрического цен-

тра антенны передатчика по формуле  $d_{rp} = \sqrt{(d_r - d_p)^2 + (H_r - H_p)^2} + \sqrt{(d_n - d_r)^2 + (h_{rs} - H_r)^2}$ .

10. Вычислить ослабление напряженности электромагнитного поля за счет дифракции радиоволн на нерегулярном ландшафте в децибелах по формуле

$$L_d = 20 \log(d_{ip} + d_{rp}) - 20 \log d_n + L(v_p) + T [L(v_i) + L(v_r) + C], \text{ где}$$

$$C = 10 + 0,00004d_n, \quad T = 1 - \exp[-L(v_p)/6].$$

### Программная реализация

Под руководством и при участии авторов разработан комплекс программ моделирования дифракции радиоволн на препятствиях, представленный в виде DLL-библиотеки *diffraction.dll* и интерактивного исполняемого модуля *diffraction.exe*. Библиотека *diffraction.dll* содержит ряд функций, которые могут использоваться разработчиками автоматизированных систем планирования радиосвязи для определения вида трассы, числа препятствий на трассе и их характеристик, определения количества и координат точек преломления пути радиоволн, вычисления ослабления напряженности электромагнитного поля при дифракции радиоволн на препятствиях, которое не будет превышено в течение заданного процента времени. Модуль *diffraction.exe* позволяет пользователю вычислять требуемые характеристики трассы и характеристики дифракции радиоволн на препятствиях в диалоговом режиме. Библиотека *diffraction.dll* и модуль *diffraction.exe* могут использоваться на Intel-совместимых компьютерах под управлением операционной системы Windows 2000 и выше.

Разработанные методы, алгоритмы и комплекс программ моделирования дифракции радиоволн на препятствиях 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 за счет дифракции радиоволн на препятствиях, которая не будет превышена в течение заданного процента времени, может быть решена с использованием разработанных методов и алгоритмов поиска и классификации препятствий на трассах и с использованием расчетных формул, опубликованных в Рекомендациях Международного союза электросвязи. Разработанные методы, алгоритмы и комплекс программ моделирования дифракции радиоволн на препятствиях могут использоваться в автоматизированных системах планирования фиксированной и мобильной радиосвязи.

## MODELING OF DIFFRACTION OF RADIO WAVES ON OBSTACLES

A.A. KARPUK, N.V. EVTIHINA

### Abstract

Methods, algorithms and software for definition of a kind of a path of distribution of radio waves, search of obstacles in a path and calculations of their characteristics, definitions of quantity and coordinates of points of refraction of a path of radio waves, calculation of attenuation of an electromagnetic field strength at diffraction of radio waves on obstacles is developed. Software is submitted

as DLL-library and the interactive executed module. Algorithms and software can be used for modeling diffraction of radio waves on obstacles in the automated systems of planning of a radio communication.

### Литература

1. *Калинин А.И.* Распространение радиоволн на трассах наземных и космических радиолоний. М., 1979. 296 с.
2. Рекомендация МСЭ-R P.526-9. Распространение радиоволн за счет дифракции. (Вопрос МСЭ-R 202/3). 2005. 37 с. (<http://www.itu.int/rec/R-REC-P.526-9-200508-I/en>).
3. Рекомендация МСЭ-R P.834-5. Влияние тропосферной рефракции на распространение радиоволн. (Вопрос МСЭ-R 201/3). 2005. 14 с. (<http://www.itu.int/rec/R-REC-P.834-5-200503-I/en>).
4. Recommendation ITU-R P.453-9. The radio refractive index: its formula and refractivity data. (Question ITU-R 201/3). 2003. 27 p. (<http://www.itu.int/rec/R-REC-P.453-9-200304-I/en>).
5. Рекомендация МСЭ-R P.452-12. Процедура прогнозирования для оценки микроволновых помех между станциями, находящимися на поверхности Земли, на частотах выше приблизительно 0,7 ГГц. (Вопрос МСЭ-R 208/3). 2005. 56 с. (<http://www.itu.int/rec/R-REC-P.452-12-200503-I/en>).