

УДК 621.371

© Омельчук А.В.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЕЙСТВУЮЩЕГО ЗНАЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В БИОЛОГИЧЕСКИ ОПАСНОЙ ЗОНЕ ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ РАДИОВОЛН ДЕЦИМЕТРОВОГО И САНТИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНОВ

*Приводится методический аппарат расчета действующего значения электромагнитного поля с учетом свойств подстилающей поверхности при распространении радиоволн дециметрового и сантиметрового диапазонов для определения биологически опасной зоны. Нормирование размеров биологически опасной зоны СВЧ излучений осуществляется исходя из значения напряженности электромагнитного поля и времени его воздействия в освещенной зоне.*

Определение действующего значения электромагнитного поля в биологически опасной зоне относится к классу задач, при котором высота поднятия передающей антенны  $h_1 > \lambda$ , где  $h_1$  – высота поднятия передающей антенны,  $\lambda$  – длина волны. В этом случае говорят о так называемых высокоподнятых антеннах, что на практике имеет место при распространении радиоволн дециметрового и сантиметрового диапазонов.

Область расстояний для расчета действующего

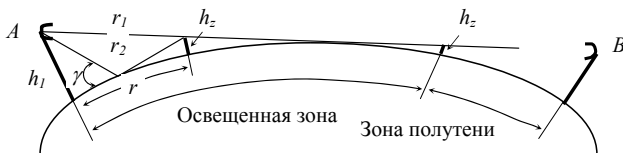


Рис.1. Определение освещенной зоны

значения электромагнитного поля в освещенной зоне при высокоподнятых антеннах определяется по соотношению между высотой поднятия антенны  $h$ , и расстоянием прямой видимости  $r$  до расчетной точки (рис. 1).

Определение поля в освещенной зоне проводится с учетом влияния земной поверхности, т.е. когда поле волны в расчетной точке представляется в виде суммы прямой волны напряженностью  $E_{np}$  и отраженной волны напряженностью  $E_{omp}$ :

$$E_{\Sigma} = E_{np} + E_{omp} \quad (1)$$

*Омельчук Александр Васильевич – кандидат технических наук, заместитель начальника отдела 4 ЦНИИ МО РФ.*

В свободном пространстве прямая волна распространяется по пути  $r_1$  (рис.1). Тогда действующее значение напряженности поля прямой волны в освещенной зоне определяется [1]:

$$E_{np} = E_{0np} \cdot \exp\left(-\frac{j(2\pi r_1)}{\lambda}\right) = \frac{\sqrt{30P_1 G_1}}{r_1} \exp\left(-\frac{j(2\pi r_1)}{\lambda}\right) \quad (2)$$

Отраженная волна, согласно отражательным свойствам земной поверхности, возбуждаясь зеркальным источником и распространяясь по пути  $r_2$ , создает в освещенной зоне напряженность поля

$$E_{omp} = E_{0omp} \cdot R \cdot \exp\left(-\frac{j(2\pi r_2)}{\lambda}\right) = \frac{\sqrt{30P_1 G_1}}{r_2} \exp\left(-\frac{j(2\pi r_2)}{\lambda} - j\Theta\right) \quad (3)$$

где  $R$  и  $\Theta$  – модуль и фаза коэффициента отражения от земной поверхности соответственно.

В общем виде коэффициент отражения от земной поверхности можно представить в виде

$$\dot{R} = \frac{\dot{E}_{omp}}{\dot{E}_{nao}} = R \cdot \exp(-j\Theta) \quad (4)$$

При падении волны на земную поверхность с относительной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$  под углом  $\gamma$  коэффициент отражения  $R$  определяется [18, 79]: для волны горизонтальной поляризации

$$R_{\parallel} = \frac{\epsilon \sin \gamma - \sqrt{\epsilon - \cos^2 \gamma}}{\epsilon \sin \gamma + \sqrt{\epsilon - \cos^2 \gamma}} = R_{\parallel} \exp(-j\Theta_{\parallel}), \quad (5a)$$

Таблица 1

Тип подстилающей поверхности	Значение диэлектрической проницаемости $\epsilon$	Значение проводимости $\sigma$
Сухой песок, степь	2	$2,5 \cdot 10^{-3}$
Влажный песок	24	$5 \cdot 10^{-2}$
Каменистая почва, галечник	4	$7,5 \cdot 10^{-4}$
Глина	4	$8 \cdot 10^{-2}$
Луга, камышовые заросли	10	$4,5 \cdot 10^{-4}$
Мокрые луга	20	$1,5 \cdot 10^{-3}$
Лес, кустарники	4	$1,1 \cdot 10^{-3}$
Болота, солончаки	80	$2 \cdot 10^{-3}$
Пресная вода	81	$2,5 \cdot 10^{-3}$

для волны вертикальной поляризации

$$R_{\perp} = \frac{\sin \gamma - \sqrt{\epsilon - \cos^2 \gamma}}{\sin \gamma + \sqrt{\epsilon - \cos^2 \gamma}} = R_{\perp} \exp(-j\Theta_{\perp}). \quad (56)$$

Для расчета коэффициента отражения  $R$  могут использоваться средние значения диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  и проводимости  $\sigma$  подстилающей поверхности, приведенные в табл. 1.

При сложении полей  $E_{np}$  и  $E_{omp}$  учитывается, что обычно  $r > h_{1z}$  и угловое расхождение векторов полей мало, поэтому векторы  $E_{np}$  и  $E_{om}$  можно считать параллельными. Это позволяет при вычислении амплитуд принимать  $r_1 \approx r_2 \approx r$ , тогда

$$E_{0np} = E_{0omp} = E_0 = \frac{\sqrt{30RG_1}}{r}. \quad (6)$$

При вычислении разности фаз  $\Delta\varphi = (2\pi/\lambda)(r_2 - r_1)$ , от которой зависит амплитуда результирующего поля, такое приближение неприемлемо. Это связано с тем, что для волн сантиметрового и дециметрового диапазонов, для которых характерно соотношение  $h_1 > \lambda$ , условие противофазности полей  $\Delta\varphi = \pi$  выполняется при разности хода прямой и отраженной волн всего в единицы сантиметров или дециметров.

Учитывая сказанное, поле отраженной волны в освещенной зоне можно записать в виде

$$\begin{aligned} \dot{E}_{omp} = E_{0omp} \exp\left(\frac{-j2\pi r_1}{\lambda}\right) \times \\ \times (1 + R \cdot \exp[-j((2\pi/\lambda)(r_2 - r_1) + \Theta)]), \quad (7) \end{aligned}$$

где  $R$  принимает значения  $R_{\parallel}$  или  $R_{\perp}$  для волны соответствующей поляризации.

По определению множителя ослабления [1]

$$\dot{V} = \frac{\dot{E}}{\dot{E}_0} = V \exp(-j\varphi_v)$$

с учетом (7) выражение для множителя ослабления в освещенной зоне принимает вид

$$\dot{V} = 1 + R \cdot \exp[-j((2\pi/\lambda)_{\Delta} r + \Theta)] = V \exp(-j\varphi_v), \quad (8)$$

где  $\Delta r = r_2 - r_1$  – разность хода прямой и отраженной волн (рис.2).

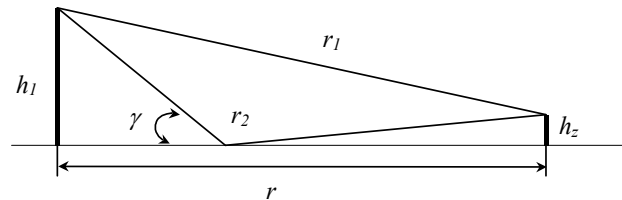


Рис.2. Определение разности хода прямой и отраженной волн

Модуль множителя ослабления из (8) определяется в виде

$$V = 1 + R \cos[(2\pi/\lambda)_{\Delta} r + \Theta] - jR \sin[(2\pi/\lambda)_{\Delta} r + \Theta]$$

или

$$V = \sqrt{1 + R^2 + 2R \cos[(2\pi/\lambda)_{\Delta} r + \Theta]}. \quad (9)$$

Фаза множителя ослабления определяется в виде

$$\Theta_v = \arctg\left(\frac{R \sin[(2\pi/\lambda)_{\Delta} r + \Theta]}{1 + R \cos[(2\pi/\lambda)_{\Delta} r + \Theta]}\right). \quad (10)$$

Для наглядности изменения поля в освещенной зоне можно определить разность хода волн через известные параметры  $r$  и  $h_1$ . Из рис.2 путем решения геометрической задачи получаются выражения для длин путей

$$\begin{aligned} r_1 = \sqrt{r^2 + h_1^2}; \\ r_2 = r - 2h_1 \cos\left(\frac{4\gamma + \pi}{4}\right) \approx r - 2h_1, \end{aligned}$$

откуда разность хода

$$\Delta r = r_2 - r_1 = r - 2h_1 - \sqrt{r^2 + h_1^2}. \quad (11)$$

Подставив (11) в (9), получим

$$V = \sqrt{1 + R^2 + 2R \cos\left[\frac{2\pi(r - 2h_1 - \sqrt{r^2 + h_1^2})}{\lambda} + \Theta\right]}. \quad (12)$$

Следовательно, действующее значение напряженности поля отраженной волны

$$\begin{aligned} E_{omp} = E_{0omp} \cdot V_{omp} = \frac{\sqrt{30PG_1}}{r} \times \\ \times \sqrt{1 + R^2 d^2 + 2Rd \cos\left[\frac{2\pi(r - 2h_1 - \sqrt{r^2 + h_1^2})}{\lambda} + \Theta\right]}. \quad (13) \end{aligned}$$

В выражении (13) коэффициент  $d$  называется коэффициентом расходимости, характеризующим изменение плотности потока мощности (напряженности) поля из-за сферичности земной поверхности и неравномерности подстилающей поверхности. Коэффициент  $d$  определяется через приведенные высоты антенн и длину зоны [1, 2]

$$d = \frac{1}{\sqrt{1 + (2r^2 h_1' h_z') / (a_{зм} (h_1' + h_z')^3)}}, \quad (14)$$

где  $a_{зм}$  – эквивалентный радиус Земли;

$$h_1' = h_1 - \frac{r^2}{2a_{зм}} \left( \frac{h_1}{h_1 + h_z} \right)^2 - \text{приведенная вы-}$$

сота антенны;

$$h_z' = h_z - \frac{r^2}{2a_{зм}} \left( \frac{h_z}{h_1 + h_z} \right)^2 - \text{приведенная вы-}$$

сота измерения поля над земной поверхностью в освещенной зоне на расстоянии  $r$  от антенны.

Из (13) видно, что при перемещении в освещенной зоне вдоль оси антенны, когда меняется  $r$ , а также при изменении высоты поднятия антенны  $h_p$ , распределение поля имеет немонотонный характер.

Максимумы поля наблюдаются на тех расстояниях  $r_m \leq r$ , где происходит синфазное сложение полей прямой и отраженной волн, т.е. когда аргумент косинуса в (13) равен

$$\frac{2\pi \left( r - 2h_1 - \sqrt{r^2 + h_1^2} \right)}{\lambda} + \Theta = 2m\pi, \text{ где } m = 1, 2, 3, \dots$$

В этих точках модуль множителя ослабления достигает величины  $V_m \neq 1 + R_m$ , где  $R_m$  – модуль коэффициента отражения в точке  $m$ -го максимума.

Минимумы поля наблюдаются на тех расстояниях  $r_n \leq r$ , где происходит синфазное сложение полей прямой и отраженной волн, т.е. когда аргумент косинуса в (13) равен

$$\frac{2\pi \left( r - 2h_1 - \sqrt{r^2 + h_1^2} \right)}{\lambda} + \Theta = (2n + 1)\pi, \text{ где } n = 1, 2, 3, \dots$$

В точках минимума модуль множителя ослабления достигает величины  $V_m \neq 1 - R_m$ , где  $R_m$  – модуль коэффициента отражения в точке  $n$ -го минимума.

Анализ выражения (13) показывает, что по мере удаления от источника излучения значения  $E_{отп}$  уменьшаются, так как угол  $\gamma$  уменьшается, а значения  $R$  увеличива-

ются. При этом заметный эффект отраженной волны будет наблюдаться лишь в том случае, когда косинус имеет максимальное значение, т.е. когда угол  $\gamma$  минимальный. Однако при этом увеличивается рассеяние поля и множителя ослабления. Поэтому максимум поля можно ожидать в том случае, когда угол  $\gamma$  лежит в пределах  $30^\circ \dots 60^\circ$ . При этом следует учитывать, что интерференция поля в освещенной зоне имеет место, если угол возвышения траектории отраженной волны удовлетворяет условию

$$\sin \gamma \geq 0,7 \cdot \sqrt[3]{\frac{\lambda}{a_{зм} \pi}}.$$

В противном случае расчету суммарного поля  $E_\Sigma$  подлежит лишь прямая (падающая) волна  $E_{np}$  по формуле (2).

Критерием оценки биологически опасной зоны при распространении радиоволн дециметрового и сантиметрового диапазонов является предельное значение напряженности  $E_{нред}$  электромагнитного поля, не превышающее допустимое значение  $E_{дон}$  за заданное время излучения  $t$

$$E_{нред} = (E_{нред} \leq E_{дон}, t \geq t_{зад}). \quad (15)$$

Исходя из этого критерия, параметром оценки биологически опасной зона может служить площадь по земной поверхности на заданной высоте  $h_z$  в створе главного (бокового) лепестка ДН передающей антенны, в пределах которой предельное значение  $E_{нред}$  не превышает допустимое за заданное время нахождения в пределах этой площади

$$S = f(E_{нред}, t_{зад}). \quad (16)$$

Биологически опасная зона определяется как зона, в пределах которой предельно допустимое значение напряженности  $E_{\Sigma нред}$  электромагнитного поля не превышает допустимое. В то же время ограничения на предельно допустимое значение напряженности  $E_{\Sigma нред}$  электромагнитного поля определяются исходя из параметров излучения (постоянное, периодическое и пр.) и времени нахождения в зоне [3].

Предельно допустимое значение  $E_{нред}$  определяется исходя из предельно допустимой энергетической нагрузки  $Q_{нред}$  и времени воздействия электромагнитного поля согласно выражению [3]

$$E_{нред} = K \frac{Q_{нред}}{t}, \quad (17)$$

где  $Q_{нред}$  – предельно допустимая энергетическая нагрузка;

$K$  – коэффициент ослабления биологический эффективности, равный: 1 – для всех случаев воздействия радиоволн ДЦВ и СВВ диапазонов от вращающихся и сканирующих антенн; 10 – для случаев воздействия радиоволн

ДЦВ и СМВ диапазонов от вращающихся и сканирующих антенн с частотой вращения (сканирования) не более 1 Гц и скважностью не менее 50;

$t$  – время нахождения в зоне воздействия электромагнитного поля в освещенной зоне.

В общем виде энергетическая нагрузка представляет собой произведение напряженности  $E_{\Sigma}$  электромагнитного поля и времени воздействия излучения  $t$

$$Q \neq E_{\Sigma} \cdot t.$$

Когда излучение является последовательным или одновременным в непрерывном и прерывистом (от вращающихся и сканирующих антенн) режимах, суммарная энергетическая нагрузка  $Q_{\Sigma}$  определяется по формуле

$$Q_{\Sigma} \neq Q_n + 0,1 \cdot Q_{np},$$

где  $Q_n, Q_{np}$  – энергетическая нагрузка от непрерывного и прерывистого излучений соответственно.

Расчет значения электромагнитного поля в освещенной зоне для определения биологически опасной зоны согласно выражению (1) осуществляется как в створе главного лепестка диаграммы направленности антенны, так в направлениях боковых лепестков. При этом при определении значения электромагнитного поля в створе главного лепестка в выражениях (2) и (3) значению  $G_1$  соответствует коэффициент усиления антенны, а в направлениях боковых лепестков – коэффициент ослабления соответствующих боковых лепестков.

#### Литература

1. ЕЛ. Черенкова, О.В. Чернышев. Распространение радиоволн. - Москва, Радио и связь, 1984.
2. Распространение радиоволн./Под редакцией М.А. Колосова. – Москва, Наука, 1975.
3. ГОСТ 12.1.006-84 (с изменениями 1999 г.).

Материал поступил в редакцию 20. 03. 2008г.