

Ю. В. Крушевский, к. т. н., доц.; Е. М. Саламон

СТРУКТУРА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОТОКОВ ЭЛЕМЕНТАРНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ В БЛИЖНЕЙ И ПРОМЕЖУТОЧНОЙ ЗОНАХ

В работе проведены теоретические исследования плотности потоков мощности электромагнитного поля элементарного электрического излучателя в ближней и промежуточной зонах. Построены диаграммы направленности этого излучателя по мощности для расстояний 2,5...50 см на средних длинах волн стандартов GSM - 900 и GSM - 1800 системы сотовой связи.

Ключевые слова: элементарный электрический излучатель, ближняя, промежуточная зоны, поток электромагнитного поля.

Введение

Электромагнитное поле элементарного электрического излучателя хорошо исследовано в дальней зоне (зоне излучения). В частности известно, что в этой части пространства плотность потока мощности поля практически имеет лишь одну радиальную составляющую и является величиной обратно- пропорциональной квадрату расстояния от излучателя до точки наблюдения.

В ближней и промежуточной зонах электромагнитное поле излучателя имеет три составляющих, которые создают два потока: радиальный, обусловленный меридиональной составляющей электрического поля и экваториальной составляющей магнитного поля, и меридиональный, обусловленный радиальной составляющей электрического поля и экваториальной составляющей магнитного поля.

Указанные обстоятельства не позволяют применять обычные в антенных задачах методы и средства измерения параметров поля излучателей в ближней и промежуточной зонах. Кроме того, к искажению таких результатов измерения приведет взаимное влияние излучателя и измерительной антенны из-за незначительного расстояния между ними.

Исследование поля в ближней и промежуточной зонах излучателей является актуальной проблемой из-за широкого использования мобильных радиотелефонов системы сотовой связи, так как стоит, например, задача дать однозначный ответ о степени вредности влияния мобильных на здоровье их пользователей, когда голова человека находится в ближне-промежуточной зоне излучения радиотелефона.

Анализ последних исследований и публикаций

Известные [1] общие выражения для комплексных амплитуд составляющих поля элементарного электрического излучателя:

$$\dot{E}_{mr} = \frac{I_m l k^2}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu_a}{\epsilon_a}} \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{kr}\right)^4 + \left(\frac{1}{kr}\right)^6} \cdot e^{-j\left(kr + \arctg \frac{1}{kr}\right)} \cdot \cos \theta, \quad (1)$$

$$\dot{E}_{m\theta} = \frac{I_m l k^2}{4\pi} \sqrt{\frac{\mu_a}{\epsilon_a}} \cdot \sqrt{\left[\frac{1}{kr} - \left(\frac{1}{kr}\right)^3\right]^2 + \left(\frac{1}{kr}\right)^4} \cdot e^{-j\left(kr + \arctg \frac{kr}{k^2 r^2 - 1} - \frac{\pi}{2}\right)} \cdot \sin \theta, \quad (2)$$

$$\dot{H}_{m\varphi} = \frac{I_m l k^2}{4\pi} \sqrt{\frac{\mu_a}{\varepsilon_a}} \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{kr}\right)^2 + \left(\frac{1}{kr}\right)^4} \cdot e^{-j\left(kr + \arctg \frac{1}{kr} - \frac{\pi}{2}\right)} \cdot \sin \theta, \quad (3)$$

где \dot{E}_{mr} и $\dot{E}_{m\theta}$ – комплексные амплитуды соответственно радиальной и меридиональной составляющих электрического поля; $\dot{H}_{m\varphi}$ – комплексная амплитуда экваториальной составляющей магнитного поля; I_m – амплитуда гармонического электрического тока в элементарном электрическом излучателе длиной l ; $k = \omega \sqrt{\mu_a \varepsilon_a} = 2\pi/\lambda$ – волновое число; μ_a , ε_a – абсолютные магнитная и диэлектрическая проницаемости среды, которая окружает излучатель; r – расстояние от излучателя до точки наблюдения поля; λ – длина волны гармонического тока в излучателе; θ – меридиональная угловая координата точки наблюдения, которое начинает свой отсчет от оси излучателя, середина которого размещена в точке начала сферической системы координат (r, θ, φ) .

В дальней зоне $kr \ll 1$ радиальной составляющей электрического поля по сравнению с меридиональной пренебрегают и считают, что в пространстве существует единственный поток вектора плотности потока мощности, который определяется по формуле:

$$\bar{P} = \frac{1}{2} \left[\dot{E}_{m\theta} \dot{H}_{m\varphi}^* \right] = \bar{r}_0 \frac{I_m^2 l^2 k^2}{32\pi^2 r^2} \cdot \sin^2 \theta. \quad (4)$$

Как видно из выражения (4), в радиальном направлении от излучателя существует поток электромагнитного поля, интенсивность которого уменьшается пропорционально росту квадрата расстояния r . Максимальное излучение направлено в экваториальной плоскости ($\theta = \pi/2$), а вдоль оси излучателя оно отсутствует ($\theta = 0, \pi$).

По характеру этот поток является потоком плотности активной мощности, которая принимает участие в радиосвязи.

Основываясь на выражении (4), в [2] для расчета плотности потока мощности \bar{P} использована формула для среднего значения вектора Пойнтинга, на основе которой было получено выражение для приближенного расчета безопасного времени пользования мобильным радиотелефоном. По проведенным расчетам для МРТ стандарта GSM - 900 это время составило приблизительно один час на протяжении суток.

Постановка задачи

Получить выражения для плотностей потоков мощности электромагнитного поля элементарного электрического излучателя в радиальном и меридиональном направлениях.

Исследовать распределение этих потоков по всем направлениям ближней и промежуточной зон поля излучателя.

Воспользовавшись полученными формулами, рассчитать уточненные значения безопасного времени пользования мобильным радиотелефоном, который работает, например, по стандартам GSM - 900 и GSM - 1800.

Основные материалы статьи

Воспользовавшись выражениями (2) и (3), найдем плотность потока мощности \bar{I}_r в радиальном направлении:

$$\begin{aligned} \dot{\vec{\Pi}}_r = \frac{1}{2} \left[\dot{\vec{E}}_{m\theta} \vec{H}_{m\varphi}^* \right] = \bar{r}_0 \frac{I_m^2 l^2 k^4}{32\pi^2} \sqrt{\frac{\mu_a}{\varepsilon_a}} \sqrt{\left[\frac{1}{kr} - \left(\frac{1}{kr} \right)^3 \right]^2 + \left(\frac{1}{kr} \right)^4} \times \\ \times \sqrt{\left(\frac{1}{kr} \right)^2 + \left(\frac{1}{kr} \right)^4} e^{-j \left(\arctg \frac{kr}{k^2 r^2 - 1} - \arctg \frac{1}{kr} \right)} \sin^2 \theta \end{aligned} \quad (5)$$

а выражениями (1) и (3) – в меридиональном направлении:

$$\begin{aligned} \dot{\vec{\Pi}}_\theta = \frac{1}{2} \left[\dot{\vec{E}}_{mr} \vec{H}_{m\varphi}^* \right] = -\bar{\theta}_0 \frac{I_m^2 l^2 k^4}{16\pi^2} \sqrt{\frac{\mu_a}{\varepsilon_a}} \sqrt{\left(\frac{1}{kr} \right)^4 + \left(\frac{1}{kr} \right)^6} \times \\ \times \sqrt{\left(\frac{1}{kr} \right)^2 + \left(\frac{1}{kr} \right)^4} e^{-j\pi h} \sin \theta \cos \theta \end{aligned} \quad (6)$$

Как видим, радиальный вектор Пойнтинга $\vec{\Pi}_r$ имеет комплексный характер, т. е.

$\dot{\vec{\Pi}}_r = \dot{\vec{\Pi}}_{ar} + j\dot{\vec{\Pi}}_{pr}$, где $\vec{\Pi}_{ar}$ – его активная часть

$$\begin{aligned} \vec{\Pi}_{ar} = \frac{I_m^2 l^2 k^4}{32\pi^2} \sqrt{\frac{\mu_a}{\varepsilon_a}} \sqrt{\left[\frac{1}{kr} - \left(\frac{1}{kr} \right)^3 \right]^2 + \left(\frac{1}{kr} \right)^4} \times \\ \times \sqrt{\left(\frac{1}{kr} \right)^2 + \left(\frac{1}{kr} \right)^4} \cos \left(\arctg \frac{kr}{k^2 r^2 - 1} - \arctg \frac{1}{kr} \right) \sin^2 \theta \end{aligned} \quad (7)$$

является средним значением вектора Пойнтинга; $\vec{\Pi}_{pr}$ – его реактивная часть

$$\begin{aligned} \vec{\Pi}_{pr} = -\frac{I_m^2 l^2 k^4}{32\pi^2} \sqrt{\frac{\mu_a}{\varepsilon_a}} \sqrt{\left[\frac{1}{kr} - \left(\frac{1}{kr} \right)^3 \right]^2 + \left(\frac{1}{kr} \right)^4} \times \\ \times \sqrt{\left(\frac{1}{kr} \right)^2 + \left(\frac{1}{kr} \right)^4} \sin \left(\arctg \frac{kr}{k^2 r^2 - 1} - \arctg \frac{1}{kr} \right) \sin^2 \theta \end{aligned} \quad (8)$$

Меридиональный вектор Пойнтинга, как видно из (6), имеет лишь реактивную составляющую

$$\vec{\Pi}_{p\theta} = -\frac{I_m^2 l^2 k^4}{32\pi^2} \sqrt{\frac{\mu_a}{\varepsilon_a}} \sqrt{\left(\frac{1}{kr} \right)^4 + \left(\frac{1}{kr} \right)^6} \sqrt{\left(\frac{1}{kr} \right)^2 + \left(\frac{1}{kr} \right)^4} \sin 2\theta. \quad (9)$$

В выражениях (7), (8) и (9) есть одинаковый множитель $A = \frac{I_m^2 l^2 k^4}{32\pi^2} \sqrt{\frac{\mu_a}{\varepsilon_a}}$, который не

зависит ни от расстояния r , ни от угловой координаты θ . Приведем указанные выражения к виду, удобному для дальнейшего анализа. Из [3] известно, что квадрат амплитуды гармонического тока в элементарном электрическом излучателе

$$I_m^2 = \frac{2P_\Sigma}{R_\Sigma},$$

где P_Σ – мощность излучения; $R_\Sigma = 80\pi^2 (l/\lambda)^2$ – сопротивление излучения указанного излучателя в свободном пространстве.

Тогда:

$$I_m^2 = \frac{P_\Sigma}{40\pi^2(l/\lambda)^2}. \quad (10)$$

Подставив (10) в выражение для A , получим:

$$\begin{aligned} A &= \frac{P_\Sigma l^2 k^2 k^2}{32\pi^2 40\pi^2 (l/\lambda)^2} \sqrt{\frac{\mu_a}{\varepsilon_a}} = \frac{P_\Sigma l^2 \omega^2 \mu_a \varepsilon_a 4\pi^2}{32\pi^2 40\pi^2 (l/\lambda)^2 \lambda^2} \sqrt{\frac{\mu_a}{\varepsilon_a}} = \\ &= \frac{P_\Sigma 4\pi^2 f^2 \mu_a \varepsilon_a}{320\pi^2} \sqrt{\frac{\mu_a}{\varepsilon_a}} = \frac{P_\Sigma f^2 \mu_a \varepsilon_a}{80} \sqrt{\frac{\mu_a}{\varepsilon_a}}. \end{aligned}$$

Поскольку средой, которая окружает излучатель, является сухой воздух, для которого $\mu_a \approx \mu_0$; $\varepsilon_a \approx \varepsilon_0$, последнее выражение переписывается так:

$$A = \frac{P_\Sigma}{80\lambda^2} \cdot 120\pi = \frac{3\pi P_\Sigma}{2\lambda^2}.$$

Если P_Σ считать в микроваттах, а длину волны λ измерять в сантиметрах, то

$$A = \frac{3\pi P_\Sigma \cdot 10^6}{2\lambda^2} \left(\frac{\text{мкВт}}{\text{см}^2} \right).$$

Среднее значение мощности излучения мобильного радиотелефона стандарта GSM - 900 считается равным 0,2 Вт, а средняя длина волны $\lambda_{1\text{ср}} = 32,8$ см. Тогда

$$A = A_1 = \frac{3\pi \cdot 20 \cdot 10^4}{2 \cdot 1075,84} = 875,6 \left(\frac{\text{мкВт}}{\text{см}^2} \right). \quad (11)$$

В стандарте GSM - 1800: $\lambda_{2\text{ср}} = 17,2$ см, среднее значение мощности излучения возьмем равным 0,1 Вт. Тогда

$$A = A_2 = \frac{3\pi \cdot 10 \cdot 10^4}{2 \cdot 295,84} = 1592,1 \left(\frac{\text{мкВт}}{\text{см}^2} \right). \quad (12)$$

Учитывая (7), (8), (9), (11) и (12), функциями направленности излучателя по мощности будут выражения

$$\begin{aligned} \Pi_{ar} &= A \sqrt{\left[\frac{1}{kr} - \left(\frac{1}{kr} \right)^3 \right]^2 + \left(\frac{1}{kr} \right)^4} \times \\ &\times \sqrt{\left(\frac{1}{kr} \right)^2 + \left(\frac{1}{kr} \right)^4} \cos\left(\arctg \frac{kr}{k^2 r^2 - 1} - \arctg \frac{1}{kr} \right) \sin^2 \theta, \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \Pi_{pr} &= A \sqrt{\left[\frac{1}{kr} - \left(\frac{1}{kr} \right)^3 \right]^2 + \left(\frac{1}{kr} \right)^4} \times \\ &\times \sqrt{\left(\frac{1}{kr} \right)^2 + \left(\frac{1}{kr} \right)^4} \sin\left(\arctg \frac{kr}{k^2 r^2 - 1} - \arctg \frac{1}{kr} \right) \sin^2 \theta, \end{aligned} \quad (14)$$

$$\Pi_{p\theta} = A \sqrt{\left(\frac{1}{kr}\right)^4 + \left(\frac{1}{kr}\right)^6} \sqrt{\left(\frac{1}{kr}\right)^2 + \left(\frac{1}{kr}\right)^4} \sin 2\theta. \quad (15)$$

Используя выражения (13), (14), (15), получим выражение для зависимости плотности потока полной мощности от расстояния r и угловой координаты θ :

$$\Pi = \sqrt{\Pi_{ar}^2 + \Pi_{pr}^2 + \Pi_{p\theta}^2}. \quad (16)$$

Построим диаграммы направленности при использовании стандартов GSM – 900 и GSM – 1800 для таких значений r : 2,5 см; 5 см; 7,5 см; 10 см; 15 см; 30 см и 50 см; подставляя в формулы (16) значение плотностей потоков мощности по выражениям (13), (14), (15) с учетом того, что $A_1 = 875,6 \text{ мкВт/см}^2$, а $A_2 = 1592,1 \text{ мкВт/см}^2$.

1) При $kr = 1$ ($r = 5,0$ см) и $A = A_1 = 875,6$ имеем

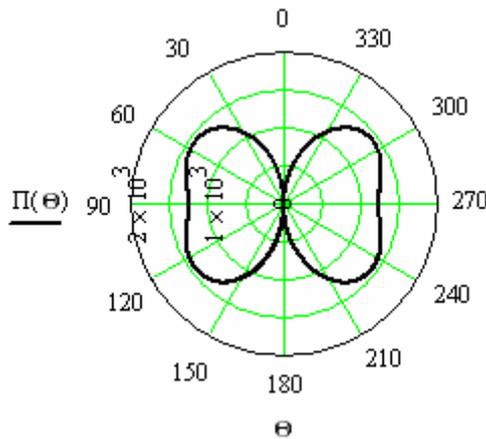


Рис. 1. Диаграмма направленности элементарного электрического излучателя по электрическому полю при $r = 5,0$ см

2) При $kr = 1$ ($r = 5,0$ см) и $A = A_2 = 1592,1$ имеем

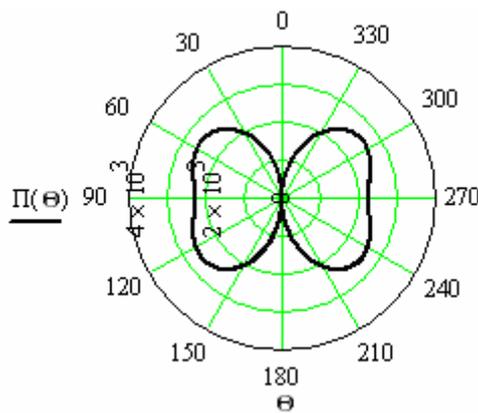


Рис. 2. Диаграмма направленности элементарного электрического излучателя по электрическому полю при $r = 5,0$ см

Важнейшие данные диаграмм направленности для других случаев представлены в таблице 1.

Таблица 1

r , см	θ	Π , мкВт/см ²	
		GSM - 900	GSM - 1800
2,5	30	$2,5 \cdot 10^4$	$4,2 \cdot 10^4$
	45	$3,2 \cdot 10^4$	$5,9 \cdot 10^4$
	90	$1,8 \cdot 10^4$	$5,2 \cdot 10^4$
7,5	30	360	650
	45	460	825
	90	420	750
10	30	200	360
	45	250	450
	90	230	410
15	30	75	160
	45	115	200
	90	100	180
30	30	22	40
	45	28	50
	90	25	45
50	30	–	14
	45	–	18
	90	–	16

Анализ полученных результатов

Считая, что ближайшая точка головного мозга находится приблизительно на расстоянии 5 см под углом 30° , на диаграмме направленности (рис. 1) видим, что плотность потока мощности равна $1,1 \cdot 10^3$ мкВт/см², которая превышает санитарный допустимый уровень (25) мкВт/см² в 44 раза. Следовательно, в диапазоне стандарта GSM - 900 время безопасного пользования МРТ на протяжении суток (1440 минут) будет равно:

$$1440 : 44 = 32,72 \text{ минуты.}$$

В диапазоне же стандарта GSM - 1800 (см. рис. 2) на этом же расстоянии превышения допустимой нормы составляет

$$2 \cdot 10^3 \text{ мкВт/см}^2 : 25 \text{ мкВт/см}^2 = 80 \text{ раз,}$$

а время безопасного пользования МРТ будет равно лишь $1440 : 80 = 18$ минут на протяжении суток.

В этом стандарте (см. табл. 1) ближайший к МРТ глаз пользователя, который находится приблизительно на расстоянии $r = 7,5$ см, под углом $\Theta = 45^\circ$ и облучается потоком мощности с плотностью 825 мкВт/см², что превышает допуск в 33 раза. Т. е. время безопасного пользования МРТ будет равно $1440 : 33 = 43,64$ минуты в сутки.

Выводы

1. Потоки электромагнитной энергии элементарного электрического излучателя в ближней и промежуточной зонах сконцентрированы в основном в направлении перпендикулярном к оси вибратора (от $\Theta = 15^\circ$ до $\Theta = 165^\circ$) с хорошо выраженными максимумами в направлениях $\Theta = 45^\circ$ и $\Theta = 135^\circ$.

2. Первый из этих максимумов облучает именно головной мозг и самый близкий к МРТ

глаз пользователя.

3. Из приведенных примеров вытекает, что уточнение расчета безопасного времени пользования МРТ является существенным, так как снижает его значение практически до 33 (GSM - 900) и 18 (GSM - 1800) минут в сутки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дослідження структури поля і спрямованості електричного елементарного випромінювача в ближній і проміжній зонах [Електронний ресурс] / Крушевський Ю. В., Кравцов Ю. І., Чернига В. В. // Наукові праці ВНТУ. – 2008. – №2. – Режим доступу до журналу http://www.nbu.gov.ua/e-journals/VNTU/2008-2/2008-2.files/uk/08kyvaia_uk.pdf

2. Вплив електромагнітного випромінювання пристроїв стільникового зв'язку на людину [Електронний ресурс] / Крушевський Ю. В., Кравцов Ю. І., Бородай Я. О. // Наукові праці ВНТУ. – 2008. – №1. – Режим доступу до журналу : http://www.nbu.gov.ua/e-journals/VNTU/2008-1/uk.files/08kyvahb_uk.pdf

3. Баскаков С.Н. Электродинамика и распространение радиоволн. – М.: Высшая школа, 1992. – 416 с.

Крушевский Юрий Владимирович – к. т. н., доцент кафедры радиотехники.

Салямон Елена Михайловна – студентка 4-го курса .
Винницкий национальный технический университет.