

ПУЧКИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН В БЕСПРОВОДНОЙ ПЕРЕДАЧЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Д.В. Комнатный, канд. техн. наук, доц.

*Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого,
Гомель, Беларусь*

Рассматривается применение пучков монохроматических электромагнитных волн в беспроводной передаче электрической энергии и в радиоэлектронной борьбе. Осуществлен выбор подходящего типа пучка. Представлено описание осесимметричного узкого пучка электромагнитных волн, который может использоваться на практике. Указано решение задачи экранирования такого пучка электромагнитными экранами из магнитодиэлектрических и биизотропных материалов. Такие материалы широко используются в современной технике.

Ключевые слова: *беспроводная передача электрической энергии, пучки электромагнитных волн, узкие пучки, электромагнитные экраны, магнитодиэлектрические материалы, биизотропные материалы.*

Проблема беспроводной передачи электрической энергии возникла на первых этапах развития энергетики и попытки ее решения продолжают до настоящего времени. Предложено решение этой проблемы – передача энергии электромагнитными волнами сверхвысокой частоты.

В настоящее время разработаны и широко внедряются в практику системы радиоэлектронной борьбы (РЭБ). Один из возможных способов этой борьбы – облучение технических средств радиоэлектроники мощными электромагнитными волнами с целью вызвать сбои и отказы элементной базы.

Между этими областями техники имеется сходство в части использования мощных электромагнитных излучений для передачи электромагнитной энергии по свободному пространству.

Для беспроводной передачи электрической энергии с полезными целями в энергетике и с деструктивными целями в радиоэлектронной борьбе представляют интерес осесимметричные пучки электромагнитных волн. Это объясняется тем, что электромагнитное поле пучка сконцентрировано в ограниченном диапазоне изменения координаты ρ цилиндрической системы координат вблизи оси Oz , по направлению которой пучок распространяется. В этой системе координат наиболее удобно описывать электромагнитные поля с осевой симметрией [1, 2]. Следовательно, передаваемая энергия также сконцентрирована в ограниченной области в месте приема и может утилизироваться со сравнительно малыми потерями.

В [1] показано, что электромагнитные поля осесимметричных пучков могут быть представлены в пространствах вектор-функций $L_\lambda(0 < \lambda < \infty)$ и $L_\rho(0 < \rho < \infty)$. Эти

представления связаны между собой интегральным преобразованием, следующим из известного интегрального преобразования Ханкеля.

Выбор типа пучка для использования в технических приложениях целесообразно выполнить в пространстве L_p . По [1] записывается простейшее выражение для электромагнитного поля пучка

$$\underline{E} = F(\rho)e^{(jm\theta - uz)}e^{-j\omega t}, \quad (1)$$

где E – напряженность электромагнитного поля, В/м;

ρ – цилиндрическая координата, м;

ω – круговая частота, рад/с;

θ – начальная фаза, рад;

m – целое число;

u – коэффициент затухания, 1/м;

t – время, с.

Среди значительного разнообразия пучков электромагнитных волн в [2] выделяются узкие пучки и пучки Лагерра–Гаусса.

Для узких пучков функция $F(\rho)$ имеет вид

$$F(\rho) = \rho^{m-1}e^{-\alpha\rho^n}, \quad m = 1, 2, 3 \dots, n = 2, 3, 4 \dots, \quad (2)$$

где α – параметр пучка.

Для пучков Лагерра–Гаусса функция $F(\rho)$ имеет вид

$$F(\rho) = (\sigma\rho)^{m+1}L_m^n(\sigma\rho)^2 \exp\left(-\frac{(\sigma\rho)^2}{2}\right), \quad (3)$$

$$n = 0, 1, 2 \dots, m = 0, 1, 2 \dots,$$

где σ – параметр пучка;

L_m^n – присоединенный полином Лагерра.

В беспроводной энергетике и в РЭБ целесообразно иметь пучки электромагнитных волн с основным максимумом энергии, приходящимся на область $0 < \rho < 1$ и не имеющие побочных максимумов. Этому условию отвечают узкие пучки электромагнитного поля при $m = 1$. В частности, при $n = 2$ из (2) имеем гауссов пучок [2].

В практических приложениях находят применение более сложные пучки электромагнитных волн. Источником такого пучка может быть плоскость $z = -h (h > 0)$, в точке $(0, 0, -h)$ которой формируется электрическое поле с тангенциальной составляющей вида [2]

$$\vec{E}_\tau = \left(E_1 e^{-\alpha_0 \left(\frac{\rho}{h}\right)^n} \vec{e}_\rho + E_2 e^{-\alpha_0 \left(\frac{\rho}{h}\right)^n} \vec{e}_\varphi \right) e^{j\varphi}, \quad (4)$$

где E_1, E_2 – постоянные размерности, В/м;

α_0 – параметр пучка;

φ – координата цилиндрической системы координат, рад;

$\vec{e}_\rho, \vec{e}_\varphi$ – орты цилиндрической системы координат.

В пространстве с $z > -h$ формируется узкий пучок электромагнитных волн, имеющий в пространстве L_λ описание [1, 2]

$$E_0 = \int_0^\infty \left[a(\lambda) M_m^{(-1)}(\rho, \lambda, k_0) + b(\lambda) M_m^{(-2)}(\rho, \lambda, k_0) \right] d\lambda; \quad (5)$$

$$H_0 = \frac{1}{jZ_0} \int_0^\infty \left[a(\lambda) M_m^{(-2)}(\rho, \lambda, k_0) + b(\lambda) M_m^{(-1)}(\rho, \lambda, k_0) \right] d\lambda;$$

$$k_0 = \frac{\omega}{c},$$

где E_0 – напряженность электрического поля пучка;

H_0 – напряженность магнитного поля пучка, А/м;

c – скорость света, м/с.

Плотности пучка $a(\lambda)$ и $b(\lambda)$ выражается из (4) с помощью преобразования Ханкеля [2] и имеют вид

$$a(\lambda) = -h \left(jE_1 g_n^{(1)}(\lambda) + h\lambda E_1 g_{1,n}^{(1)}(\lambda) \right) e^{-u_0(\lambda)h}; \quad (6)$$

$$b(\lambda) = \frac{k_0 h}{u_0(\lambda)} \left(hE_1 \lambda g_{1,n}^{(1)}(\lambda) - jE_2 g_n^{(1)}(\lambda) \right) e^{-u_0(\lambda)h};$$

$$u_0(\lambda) = \begin{cases} \sqrt{\lambda^2 - k_0^2}, & \lambda \geq k_0; \\ -j\sqrt{k_0^2 - \lambda^2}, & k_0 > \lambda. \end{cases}$$

Специальные функции $M_m^{(-1)}, M_m^{(-2)}, g_n^{(1)}, g_{1,n}^{(1)}$ определены в [2].

При использовании пучков электромагнитных волн большой энергии требуется обеспечение безопасности людей и технических средств. При передаче электрической энергии необходима защита оборудования и окружающих объектов от попадания пучка при сбое направления излучения. В РЭБ важнейшей задачей является защита рецепторов помех от вредоносных излучений. Основным способом защиты от электромагнитных полей является электромагнитное экранирование. При проектировании электромагнитных экранов требуется определить уровень отраженного электромагнитного поля перед экраном и уровень поля, проникшего в область за экраном, а также рассчитать коэффициент экранирования.

В [2] методом двусторонних граничных условий решена задача экранирования пучков электромагнитных волн типа (5) плоскими однослойными и многослойными магнитоэлектрическими и биизотропными экранами. Получены аналитические соотношения

для характеристик отраженного и прошедшего через экран электромагнитных полей, а также коэффициента экранирования. Таким образом задача экранирования решена для пучков, представленных в пространстве L_λ . В настоящее время широко применяются экраны из композитных материалов, которые являются магнитоэлектрическими или биизотропными. Такие материалы обеспечивают высокую эффективность экранирования при снижении массы конструкции. Поэтому, указанное представление пучков электромагнитных волн имеет большое практическое значение.

Следовательно, можно сделать вывод, что результаты, полученные при исследовании пучков электромагнитных волн и решении задачи об их экранировании экранами из современных композитных материалов, позволяют перейти к решению технических задач, возникающих при эксплуатации систем беспроводной передачи электрической энергии и систем РЭБ. Особенно актуальной в современных условиях является защита критически важных объектов информатизации от средств РЭБ и электромагнитных атак. Таким образом, рассмотренный в докладе вопрос имеет значительный практический интерес.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ерофеенко, В. Т. Аналитическое моделирование в электродинамике / В. Т. Ерофеенко, И. С. Козловская. – М. : Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2014. – 304 с.
2. Ерофеенко, В. Т. Задачи экранирования электромагнитных полей экранами из композитных материалов / В. Т. Ерофеенко. – Минск : Изд. центр БГУ, 2023. – 271 с.