

УДК 621.385

РАДИОФИЗИЧЕСКИЕ И ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ НАЗЕМНОЙ МИКРОВОЛНОВОЙ ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ

Г. М. Казарян, А. В. Рудаков, В. Л. Саввин

(кафедра радиофизики)

E-mail: savvin@phys.msu.ru

Развита численная модель поля излучения микроволновой линии передачи энергии, проведен расчет уровня боковых лепестков в плоскости приемной антенны для различных вариантов наземной линии передачи. Показано, что проблема экологически чистой и безопасной передачи энергии микроволнами может быть решена путем оптимизации амплитудно-фазового распределения поля по поверхности передающей антенны.

Современные исследования в сфере генерации и преобразования микроволн в энергию постоянного тока создали основу для реализации высокоэффективных систем беспроводной передачи энергии [1]. Наряду с проблемами высокой эффективности и сравнительно малой стоимости таких систем на первый план выходят задачи их экологической безопасности и снижения уровня фонового излучения за пределами приемной антенны, что особенно важно для наземных линий передачи [2]. Проект первой наземной беспроводной линии передачи (остров Реюньон, Франция) предполагает снабжение электроэнергией небольшой деревни, расположенной в глубоком кратере потухшего вулкана, где монтаж обычных силовых кабелей затруднен из-за сложности рельефа и высокой стоимости работ [3].

Крайне важно, чтобы уровень фонового излучения за пределами приемно-преобразующего комплекса наземной микроволновой линии передачи не превышал экологически безопасного уровня. По западным стандартам микроволновое излучение считается безопасным при плотности мощности менее 100 Вт/м². Этот уровень фонового излучения может быть достигнут путем поиска оптимальных амплитудно-фазовых распределений поля на поверхности передающей антенны.

Характеристики микроволнового луча в плоскости приемной антенны можно определить из теории дифракции Френеля–Кирхгофа. Наиболее часто используются аксиально-симметричные передающие антенны с линейной поляризацией электрического поля. Связь комплексных напряженностей электрического поля на передающей \hat{E}_A и приемной \hat{E}_R антеннах имеет вид

$$\hat{E}_R(r) = -j \frac{k}{D} e^{-j(kD + kr^2/2D)} \times \int_0^{R_1} \hat{E}_A(r') e^{-jkr'^2/2D} J_0\left(\frac{kr r'}{D}\right) r' dr', \quad (1)$$

где $\hat{E}_A = E_A e^{j\Psi_A}$, $\hat{E}_R = E_R e^{j\Psi_R}$, E_A и E_R — амплитудные распределения (АР) электрического поля на передающей и приемной антеннах, Ψ_A и Ψ_R —

соответствующие фазовые распределения (ФР), k — волновое число, D — расстояние между антеннами, $J_0(z)$ — функция Бесселя нулевого порядка, r и r' — текущие радиусы в системе координат приемной и передающей антенн, R_1 — радиус передающей антенны.

Фокусирующее квадратичное фазовое распределение $\Psi_A(r) = kr^2(2D)^{-1}$ максимально концентрирует излучаемую мощность в фиксированную приемную апертуру. Такое фазовое распределение оптимально по КПД и будет использоваться в дальнейшем. Из (1) следует, что фазовый фронт пучка, падающего на приемную антенну, является расходящимся, а ФР имеет вид

$$\Psi_R(r) = \frac{\pi}{2} - kD - \frac{kr^2}{2D}.$$

Из (1) получаем:

$$E_R(r) = \frac{k}{D} \int_0^{R_1} E_A(r') J_0\left(\frac{kr r'}{D}\right) r' dr'. \quad (2)$$

Будем считать, что амплитудное распределение на передающей антенне является непрерывным и представимо в виде

$$E_A(r) = E_{\max} \sum_{n=1}^N n k_n \left(1 - \frac{r^2}{R_1^2}\right)^{n-1}, \quad r \leq R_1, \quad (3)$$

где E_{\max} — поле излучения в центре антенны, k_n — коэффициенты разложения, нормированные так, что максимальное значение суммы в (3) по модулю равно единице. Тогда (2) примет вид

$$E_R(r) = E_{\max} \frac{kR^2}{2D} \sum_{n=1}^N k_n \Lambda_n\left(\frac{kR_1 r}{D}\right), \quad (4)$$

где $\Lambda_n(z)$ — лямбда-функция первого рода n -го порядка:

$$\Lambda_n(z) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{n!}{k!(n+k)!} \left(\frac{iz}{2}\right)^{2k} = \Gamma(n+1) \left(\frac{2}{z}\right)^n J_n(z), \quad (5)$$

которая выражается через функцию Бесселя $J_n(z)$ первого рода и гамма-функцию $\Gamma(z)$, $z = kR_1 r/D$. Распределение плотности мощности $p_R(r)$ в плоскости приемной антенны будет иметь вид

$$p_R(r) = p_A \left(\frac{kR_1^2}{2D} \right)^2 \left[\sum_{n=1}^N k_n \Lambda_n(2\tau r/R_2) \right]^2, \quad (6)$$

где $p_A = Z_0^{-1} E_{\max}^2$ — максимальная плотность мощности на передающей антенне, R_2 — радиус приемной антенны, $Z_0 = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0} = 120\pi$ — волновое сопротивление свободного пространства, ϵ_0 и μ_0 — диэлектрическая и магнитная постоянные вакуума. Уровни передаваемой P_T и принимаемой P_R мощности определяются путем интегрирования выражений (3) и (4) по площадям соответствующих апертур передающей и приемной антенн. КПД рассматриваемой системы равен отношению P_R/P_T и в конечном итоге не зависит от p_A и величины передаваемой мощности P_T , и определяется только коэффициентами разложения (5) k_n и величиной волнового параметра $\tau = \pi R_1 R_2 / \lambda D$, где λ — длина волны, на которой ведется передача энергии. Максимальные значения КПД достигаются при гауссовом АР на передающей антенне [2].

Передающую антенну большого радиуса представляется наиболее рациональным заменить фазированной решеткой стандартных излучателей. Поэтому перейдем к анализу характеристик системы с дискретным амплитудным распределением поля на передающей антенне и разобьем передающую антенну на N концентрических колец. Амплитудное распределение будет иметь вид

$$E_A(r) = \begin{cases} E_n, & r_{n-1} \leq r \leq r_n, \quad n = 1, 2, \dots, N, \\ 0, & r > r_N = R_1, \end{cases} \quad (7)$$

где E_n и r_n — амплитуда и радиус n -й ступеньки; N — число ступенек дискретного амплитудного распределения; $E_{N+1} = 0$, $r_0 = 0$. Тогда из (2) получим:

$$E_R(r) = E_{\max} \frac{kR_1^2}{2D} \sum_{n=1}^N \Delta \epsilon_n x_n^2 \Lambda_1(2\tau x_n r/R_2), \quad (8)$$

где $E_{\max} = \max_{1 \leq n \leq N} \{E_n\}$; $\Delta \epsilon_n = \epsilon_n - \epsilon_{n+1}$; $\epsilon_n = E_n/E_{\max}$ и $x_n = r_n/R_1$ — относительные амплитуда и радиус n -й ступеньки.

Выражение для плотности мощности на поверхности приемной антенны примет следующий вид:

$$p_R(r) = p_A \left(\frac{kR_1^2}{2D} \right)^2 \left[\sum_{n=1}^N \Delta \epsilon_n x_n^2 \Lambda_1(2\tau x_n r/R_2) \right]^2, \quad (9)$$

$$p_R(0) = p_A \left(\frac{kR_1^2}{2D} \right)^2 \left[\sum_{n=1}^N \Delta \epsilon_n x_n^2 \right]^2. \quad (10)$$

Значения передаваемой и принимаемой мощности можно найти путем интегрирования соответствующих

плотностей мощности по всей поверхности антенны.

Проведем сравнительный анализ нескольких вариантов систем с различным амплитудным распределением на передающей антенне для нахождения оптимального распределения, при котором линия имеет высокий КПД и достаточно низкий уровень фона. Мощность излучения передающей антенны составляла около 14 кВт во всех исследуемых вариантах при фиксированном расстоянии между антеннами $D = 700$ м и радиусе передающей антенны $R_1 = 2.4$ м.

Для однородного амплитудного распределения поля на передающей антенне (см. вариант 1 на рис. 1) рассчитывались выходные характеристики системы для двух частот: 2.45 ГГц и 5.8 ГГц. При $\tau = 1.5$ эффективность передачи может достигать 81.7% при значениях радиуса приемной антенны 17.1 м для частоты 2.45 ГГц и 7.2 м для частоты 5.8 ГГц. Уровень подавления первого бокового лепестка составил -17.57 дБ относительно плотности мощности в центре приемной антенны (рис. 2, кривая 1). Оптимизация АР на передающей антенне дает возможность заметно повысить КПД передачи и снизить уровень фонового излучения. При плотности мощности в центре передающей антенны $p_A = 1.7$ кВт/м² и гауссовом распределении поля (спад мощности к краю антенны равен -9.5 дБ)

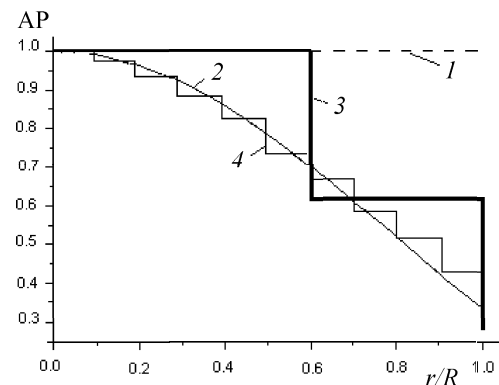


Рис. 1. Вид амплитудного распределения поля на передающей антенне (АР): 1 — однородное АР, 2 — равномерное гауссово АР, 3 — двухступенчатое АР, 4 — десятиступенчатое гауссово АР

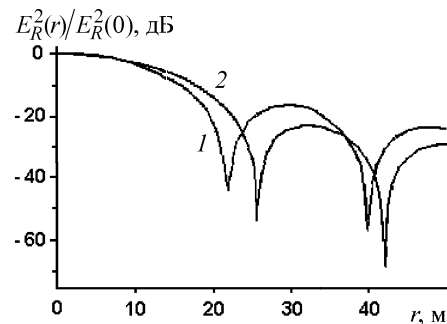


Рис. 2. Зависимости распределения $E_R^2(r)/E_R^2(0)$ в плоскости приемной антенны от текущего радиуса: 1 — для однородного АР, 2 — для равномерного гауссова АР

достигнем уровень КПД 88.7%. При этом передаваемая мощность составляла 13.3 кВт, а принимаемая мощность 11.8 кВт. Плотность мощности в центре приемной антенны достигала 3 мВт/см² и убывала на -9.5 дБ к ее краю. Уровень подавления первого бокового лепестка составил -23.4 дБ относительно плотности мощности в центре приемной антенны (рис. 2, кривая 2). Рассчитанный радиус приемной антенны составил 17 м.

Рассчитано поле излучения в плоскости приема для оптимального гауссового распределения поля (равномерного и десятиступенчатого) на передающей антенне (соответственно варианты 2 и 4 на рис. 1, частота излучения 2.45 ГГц, $\tau = 1.5$). Зависимости амплитудного распределения $p_R(r)$ на приемной антенне, нормированные на значение плотности мощности в центре $p_R(0)$, практически совпадают (рис. 3, кривая 1).

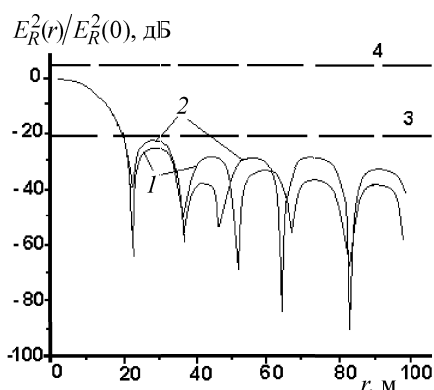


Рис. 3. Зависимости распределения $E_R^2(r)/E_R^2(0)$ в плоскости приемной антенны от текущего радиуса: 1 — для двухступенчатого АР, 2 — для десятиступенчатого гауссова АР, 3 — уровень безопасного микроволнового облучения (стандарт РФ), 4 — западный стандарт

Проанализируем возможность создания высокоэффективной передающей антенны с амплитудным распределением, более подходящим для технической реализации, нежели десятиступенчатое гауссово. В качестве примера, рассмотрим двухступенчатое распределение, т. е. распределение, при котором центральная часть антенны имеет большую амплитуду поля, чем кольцевая наружная часть. Проведенные расчеты дали возможность найти оптимальные соотношения ширины ступеней и амплитуд поля на них. При двухступенчатом распределении центральный и первый боковой лепестки в плоскости приемной антенны практически совпадают с аналогичными

лепестками для оптимального десятиступенчатого гауссового распределения (рис. 3, кривые 1 и 2). При этом КПД передачи энергии микроволн достигает порядка 86%, что лишь на 1.5% меньше, чем при оптимальном гауссовом распределении. Уровень первого бокового лепестка составил -21.2 дБ по отношению к центральному.

Основные результаты проведенных расчетов для различных АР на передающей антенне для анализируемой линии передачи представлены в табл. 1. Как видно, оптимизированное двухступенчатое распределение характеризуется высоким КПД и низким уровнем фонового излучения, незначительно уступающими варианту с оптимальным гауссовым распределением, и выгодно отличается от него простотой технического исполнения.

Как видно из табл. 1 и рис. 3, фоновое излучение за пределами зоны центрального лепестка для проанализированного варианта наземной микроволновой линии передачи может быть доведено до уровня, соответствующего требованиям стандарта РФ (0.1 Вт/м²). С точки зрения западных стандартов микроволновая линия передачи энергии такого масштаба является абсолютно безопасной даже в области центрального лепестка.

Использование двухступенчатого амплитудного распределения может существенно облегчить задачу практического конструирования микроволновой линии передачи энергии. Возможно применение унифицированных излучателей на базе магнетронов с мощностью ~1 кВт, применяемых в микроволновых печах. Схема передающей антенны из 19 унифицированных излучателей представлена на рис. 4.

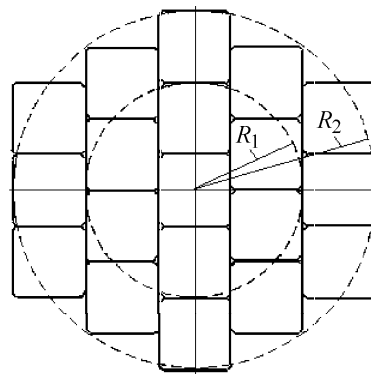


Рис. 4. Схема передающей антенны из 19 унифицированных модулей: R_1 и R_2 — радиусы первой и второй ступеней в двухступенчатом АР

Таблица 1

Вид амплитудного распределения	Равномерное	Гауссово 10-ступенчатое	Оптимизированное двухступенчатое
КПД передачи	81.25 %	88.22 %	86.5 %
Уровень 1-го бокового лепестка	0.29 Вт/м ² (-17.5 дБ)	0.07 Вт/м ² (-23.3 дБ)	0.11 Вт/м ² (-21.2 дБ)
Радиус 1-го бокового лепестка	29.3 м	31.9 м	31.1 м

Плотность мощности на излучателях, заполняющих периферийную часть передающей антенны, в 1.6 раза меньше, чем в центральной ее части. Отдельные излучатели могут быть смещены на некоторое расстояние друг относительно друга при соответствующей синхронизации генераторов. Таким образом, может быть облегчена задача монтажа антенн на крутом склоне, так как в этом случае и приемную и передающую антенны можно разбить на несколько небольших систем, плоскости которых параллельны друг другу и нормальны к направлению излучения.

Таким образом, рассчитано распределение поля излучения в приемной плоскости для непрерывного и дискретного (ступенчатого) распределения поля на передающей антенне. Найдено простейшее двухступенчатое распределение поля излучения на передающей антенне, позволяющее реализовать КПД передачи энергии более 86% и безопасный уровень фоно-

вого излучения как за пределами приемной антенны, так и в ее центре. Такое распределение существенно упрощает техническую реализацию передающей антенны, конструкцию которой можно представить в виде системы однотипных излучающих блоков.

Литература

1. Диденко А.Н. СВЧ-энергетика: теория и практика. М., 2003.
2. Рачников А.В. Физические процессы в системах передачи энергии СВЧ-пучком. Дисс. ... канд. физ.-мат. наук. МГУ. Физ. ф-т. М., 1987.
3. Guy P., Lan Sun Luk J. WPT demonstration model. ISAS RN 573, 1995. P. 1.
4. Zepeda P., Chang K., Little F. IAF-R.2.01. Huston, 2002. P. 1.

Поступила в редакцию
22.09.04