

ТЕОРИЯ СИГНАЛОВ И ИХ ОБРАБОТКА

УДК 662.396.67:621.314.6

*В. М. ШОКАЛО, д-р техн. наук, А. М. РЫБАЛКО, канд. физ.-мат. наук,
А. А. КОНОВАЛЬЦЕВ, канд. техн. наук, М. А. ОМАРОВ, канд. техн. наук, Д. В. ГРЕЦКИХ*

ЭФФЕКТИВНОСТЬ МИКРОВОЛНОВЫХ СИСТЕМ БЕСПРОВОДНОЙ ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ ПРИ НЕОПТИМАЛЬНОМ КПД ПЕРЕХВАТА

Беспроводная передача энергии (БПЭ) посредством СВЧ-луча положена в основу построения перспективных систем космической энергетики, выполняемых по следующей схеме: первичный источник энергии – генератор СВЧ – передающая антенна – трасса распространения СВЧ-луча – ректенна – потребитель. Принцип работы систем БПЭ основан на передаче энергии сфокусированным СВЧ-пучком от передающей антенны к находящейся в зоне Френеля ректенне, с последующим преобразованием в ней принятой энергии в постоянный ток. В системах БПЭ большой мощности ректенны (антенны-выпрямители) представляют собой крупноапертурные нефазированные антенные решетки (излучатели, нагруженные на СВЧ-диоды Шоттки). Совокупность приемно-выпрямительных элементов (ПВЭ), расположенных в узлах двухмерной решетки, образует приемно-выпрямительную апертуру (ПВА) ректенны. Мощность постоянного тока с выходов всех ПВЭ суммируется схемой сбора мощности (ССМ).

Эффективность системы БПЭ как энергосистемы оценивается такими энергетическими характеристиками: результирующим КПД, удельной поверхностной мощностью (мощностью постоянного тока, снимаемой с единицы площади апертуры ректенны) и угловым распределением интенсивности поля побочного излучения, появление которого обусловлено наличием нелинейных элементов в ректенне.

Рассмотрим возможные пути достижения высокого результирующего КПД систем БПЭ. Как известно, этот КПД

$$\eta_s = \eta_g \eta_t L \eta_\Sigma,$$

где η_g – КПД преобразования энергии первичного источника в энергию СВЧ-генератора; η_t – КПД тракта передачи между генератором и передающей антенной и самой антенны; L – затухание на трассе распространения СВЧ-луча; η_Σ – КПД, учитывающий потери при перехвате СВЧ-луча апертурой ректенны, при выпрямлении СВЧ-колебаний ректенной и сборе мощности постоянного тока в ССМ.

Методы оптимизации составляющих η_g , η_t и значения затухания L на различных трассах уже хорошо изучены, поэтому нами детально исследовалась лишь величина η_Σ , которая присуща только системам БПЭ и определяется особенностями их функционирования.

Приближенно КПД η_Σ можно представить в виде трех парциальных КПД [1]:

$$\eta_\Sigma = \bar{\eta} \eta_r \eta_0 = \frac{P_m}{P_\Sigma} \frac{P_{0m}}{P_m} \frac{P_0}{P_{0m}}, \quad (1)$$

где $\bar{\eta}$, η_r , η_0 – КПД перехвата, выпрямления и сбора мощности постоянного тока соответственно; P_m – максимальная мощность, которую может извлечь ректенна из свободного

пространства; P_{Σ} – мощность, излучаемая передающей антенной; P_{0m} – суммарная мощность постоянного тока на выходах ПВЭ, нагруженных на оптимальную нагрузку по постоянному току; P_0 – мощность в нагрузке ректенны.

Вопросам максимизации КПД η_{Σ} посвящен целый ряд работ, например [2; 3], однако данная задача в настоящее время до конца не решена. Известно лишь, что для достижения максимального КПД перехвата амплитудное распределение вдоль апертуры ректенны при больших значениях $\bar{\eta}$ должно быть существенно неравномерным и описываться функцией Гаусса. Но, как показано в [3], повышение КПД перехвата приводит к достаточно большому снижению КПД выпрямления и сбора, что ограничивает эффективность систем БПЭ.

Попытка разрешить противоречие между повышением КПД перехвата и снижением КПД выпрямления и сбора приводит к идее создания систем БПЭ с равномерным амплитудным распределением поля падающего СВЧ-пучка по апертуре ректенны. Проверка целесообразности воплощения этой идеи при построении систем БПЭ и составляет цель написания данной работы.

Для реализации данной идеи должны быть последовательно решены такие задачи:

- синтез поля возбуждения, обеспечивающего амплитудное распределение по апертуре ректенны, максимально близкое к равномерному, при заданных геометрии и рабочей частоте системы БПЭ;

- определение КПД перехвата, выпрямления и сбора крупноапертурной ректенны при заданном амплитудно-фазовом распределении ее поля возбуждения;

- сравнение на конкретных численных примерах эффективности двух вариантов систем БПЭ: первого – с оптимальным по критерию максимума КПД перехвата гауссовским (согласно Губо) распределением поля возбуждения и второго – с оптимальным по критерию максимальной близости к равномерному амплитудным распределением по апертуре ректенны.

Для решения поставленных задач реальная система БПЭ была упрощена: рассматривались находящиеся в зоне Френеля в общем случае на расстоянии $D \neq D_0$ (D_0 – расстояние фокусировки) две круглые соосные и параллельные апертуры с радиусами R_1 (передающая антенна) и R_2 (апертура ректенны).

Синтез поля возбуждения. Так как задача синтеза поля возбуждения по критерию максимума КПД перехвата (система БПЭ первого варианта) решена, рассмотрим лишь синтез поля возбуждения апертуры ректенны, максимально близкого к равномерному (система БПЭ второго варианта). При этом будем полагать, что $D = D_0$, а в качестве исходного по результатам работы [4] запишем выражение для напряженности электрического поля излучения передающей антенны с апертурой круглой формы, которая возбуждается линейно поляризованным полем

$$E(x, y, D) = \frac{jke^{-jkD}}{D} e^{-jk(x^2 + y^2)/2D} \int_0^{R_1} E(\rho, 0) e^{-jk\rho^2/2D} J_0\left(\frac{k\rho\sqrt{x^2 + y^2}}{D}\right) \rho d\rho, \quad (2)$$

где k – волновое число; $E(\rho, 0)$ – поле в раскрыве передающей антенны; $J_0(z)$ – функция Бесселя нулевого порядка. Положим, что для осуществления фокусировки поле раскрыва передающей антенны имеет место квадратичный фазовый набег такой, что величина

$$E(\rho, 0) e^{-jk\rho^2/2D} = F(\sqrt{kR_2/DR_1}\rho)$$

является амплитудой этого поля. Сделаем замену переменной в интеграле соотношения (2), положим $\sqrt{kR_2 / DR_1\rho} = t$. Тогда поле в плоскости апертуры ректенны круглой формы радиуса R_2 можно представить в виде

$$E(u, D) = j \frac{R_1}{R_2} e^{-jk(D+R_2^2 u^2 / 4D\tau)} \int_0^{\sqrt{2\tau}} F(t) J_0(ut) t dt,$$

где $u = \sqrt{2\tau} \sqrt{x^2 + y^2} / R_2$ – нормированное расстояние от центра ректенны до произвольной ее точки; $\tau = \pi R_1 R_2 / \lambda D$ – число Френеля. Введем нормированное поле излучения

$$E_n(u) = -j e^{jk(D+R_2^2 u^2 / 4D\tau)} E(u, D) R_1 / R_2$$

и перепишем последнее соотношение в виде интегрального оператора, действующего на функцию возбуждения:

$$E_n[F] = \int_0^{\sqrt{2\tau}} F(t) J_0(ut) t dt. \quad (3)$$

Положим в дальнейшем, что функция возбуждения $F(t)$ такова, что

$$\int_0^{\sqrt{2\tau}} F(t) t^2 dt < \infty.$$

Это условие выполняется для широкого класса функций и, по существу, не является ограничением для амплитуды поля возбуждения передающей антенны.

Идея восстановления поля раскрыва передающей антенны по заданному полю облучения $E_n^0(u)$ заключается в следующем. Продолжим функцию возбуждения $F(t)$ на всю положительную полуось, приняв ее вне интервала $(0, \sqrt{2\tau})$ равной нулю. Физически это приближение означает, что в плоскости апертуры передающей антенны поле вне апертуры не учитывается. Тогда формула (3) представляет собой преобразование Фурье–Бесселя от финитной функции и можно записать

$$E_n(u) = f[F] = \int_0^{\infty} F(t) J_0(ut) t dt.$$

Если на заданное поле облучения ректенны $E_n^0(u)$ наложить ограничение

$$\int_0^{\infty} E_n(u) u^{1/2} du < \infty,$$

которое реализуется для широкого класса полей, то для нахождения возбуждающей функции, формирующей это поле, можно воспользоваться обратным преобразованием Фурье–Бесселя

$$F(t) = f^{-1}[E_n] = \int_0^{\infty} E_n(u) J_0(ut) u du, \quad (4)$$

$$t \in (0, \infty), \left(\int_0^{\infty} F(t) t^{\frac{1}{2}} dt < \infty \right).$$

Подставив найденную из этого соотношения функцию возбуждения $F(t)$ в равенство (3), получим поле облучения ректенны, которое будет совпадать с заданным $E_n^0(u)$ только в случае финитности функции $F(t)$, т.е. равенства ее нулю для $t > \sqrt{2\tau}$. На практике найденное возбуждение можно реализовать лишь на апертуре антенны, считая поле вне апертуры равным нулю, поэтому сформировать с высокой точностью в плоскости ректенны можно лишь те поля, для которых соотношения (4) дают функции возбуждения со строго равными нулю значениями вне интервала $(0, \sqrt{2\tau})$. Положив в соотношении (4) нормированное поле равным единице для $u \in (0, \sqrt{2\tau})$ и нулю для остальных значений переменной, определим оптимальное возбуждение, формирующее равномерное распределение поля по апертуре ректенны. Воспользуемся разложением функции Бесселя нулевого порядка в степенной ряд [5]:

$$J_0(z) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n (z/2)^{2n}}{(n!)^2}.$$

Так как после почленного интегрирования в (4) полученный ряд сходится равномерно, оптимальное возбуждение представляется в виде

$$F(t) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k}{k!(k+1)!} \left(\frac{\tau}{2}\right)^{k+1} t^{2k}, \quad t \in (0, \sqrt{2\tau}). \quad (5)$$

При расчетах будем считать, что данное распределение можно реализовать лишь в раскрыве передающей антенны ($t \in (0, \sqrt{2\tau})$), поэтому поле излучения будет формировать усеченная функция возбуждения, равная нулю вне интервала $(0, \sqrt{2\tau})$, что приведет к ухудшению аппроксимации равномерного распределения. Определим это поле, воспользовавшись равенством (3):

$$E_n(u) = 2 \int_0^{\sqrt{2\tau}} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k}{k!(k+1)!} \left(\frac{\tau}{2}\right)^{k+1} t^{2k} J_0(ut) t dt = \sum_{m,k=0}^{\infty} \frac{(-1)^{k+m} (\tau/2)^{2k+m+2} 2^{2k+2}}{k!(k+1)!(m!)^2 (k+m+1)} u^{2m}. \quad (6)$$

Расчетные зависимости амплитудного распределения по передающей и приемной антеннам для первого и второго вариантов систем БПЭ (в первом варианте системы БПЭ реализуется условие максимального КПД перехвата, т.е. $F(t) = e^{-0,225\tau t^2}$) показаны на рис. 1 и 2.

Из представленных данных видно, что на передающей антенне гауссовское распределение (сплошная кривая) спадает к краям менее быстро, а на ректенне наоборот – синтезированное распределение (пунктирная кривая) более равномерное, чем гауссовское. Отсюда можно сделать вывод, что в системе БПЭ второго варианта КПД выпрямления и сбора будет выше.

Анализ полученного оптимального поля излучения показывает, что даже теоретически при любом значении параметра τ невозможно сформировать на апертуре ректенны равномерное поле. При $\tau \ll 1$, т.е. когда ректенна находится в дальней зоне, поле будет практически равномерным, но тогда будут очень велики потери энергии системы вследствие ее рассеивания в пространстве. С увеличением значения параметра τ , что соответствует повышению эффективности системы БПЭ, неравномерность поля облучения апертуры ректенны монотонно возрастает.

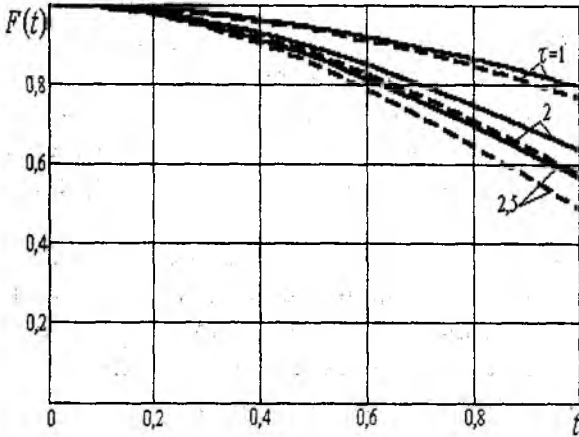


Рис. 1

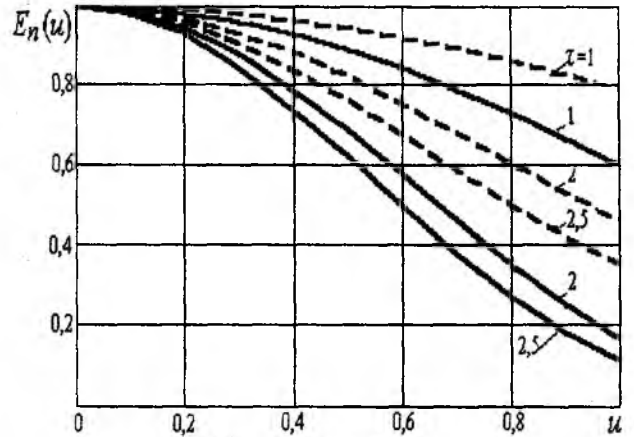


Рис. 2

Определение КПД перехвата, выпрямления и сбора. Возбуждение ректенны, описанное соотношением (6), приводит к снижению КПД перехвата СВЧ-энергии системы по сравнению с КПД при гауссовском возбуждении [4]. С целью определить это снижение найдем соотношение для КПД перехвата. Так как КПД перехвата $\bar{\eta}$ определяется отношением мощности падающей на поверхность апертуры ректенны электромагнитного потока ко всей излучаемой мощности, после простых преобразований выражение для $\bar{\eta}$ принимает вид [4]

$$\bar{\eta} = \frac{\int_0^{\sqrt{2\tau}} \left| \int_0^{\sqrt{2\tau}} F(t) J_0(ut) dt \right|^2 u du}{\int_0^{\sqrt{2\tau}} |F(t)|^2 t dt},$$

где функция возбуждения $F(t)$ для синтезированного поля определена равенством (5). Подставив правую часть выражения (4) в последнее соотношение, получим

$$\bar{\eta}(\tau) = \frac{\sum_{l,k=0}^{\infty} \beta_l \beta_k \frac{(2\tau)^{l+k+1}}{l+k+1}}{4 \sum_{n,m=0}^{\infty} \alpha_n \alpha_m \frac{(2\tau)^{n+m+1}}{n+m+1}},$$

где $\alpha_n = \frac{(-1)^n \left(\frac{\tau}{2}\right)^n}{(n!)^2 (2n+2)}$; $\beta_m = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\alpha_n \alpha_m (2m+2)(2\tau)^{n+1}}{n+m+1}$; $n, m = 0, 1, 2, \dots$

Зависимость величины $\bar{\eta}$ от числа Френеля для обоих случаев представлена на рис. 3. Из него видно, что для синтезированного поля (пунктирная кривая) по сравнению с опти-

мальным полем возбуждения [4] (сплошная кривая) при $\tau = 2$ проигрыш по КПД перехвата составляет 4 %. Чтобы для этого случая оценить общую эффективность системы БПЭ, нужно вычислить КПД выпрямления и сбора энергии.

Расчет КПД выпрямления неравномерно облучаемой крупноапертурной ректенны с использованием приближения бесконечной решетки с нелинейными элементами проводился в соответствии с методикой, опубликованной в [6]. Для расчета КПД сбора мощности постоянного тока была использована известная из [7]

методика, основанная на представлении каждого ПВЭ в виде эквивалентного генератора постоянного тока с ЭДС E_i и внутренним сопротивлением R_i . Указанные параметры определялись из нагрузочных характеристик ПВЭ.

Вычисления КПД выпрямления и сбора ректенны с $R_1 = R_2 = 200\lambda$, $\tau = 2$, $D = D_0$ выполнялись для частоты 2,45 ГГц. Предполагалось, что ПВЭ по постоянному току нагружены на оптимальное сопротивление; в них

используются: диоды Шоттки с допустимой СВЧ-мощностью 1 Вт, однополупериодные схемы выпрямления с идеальными фильтрами (излучение на частотах гармоник отсутствует), а также расположенные над экраном в узлах квадратной сетки с шагом $0,5\lambda$ резонансные полуволновые вибраторы.

Сравнение эффективности вариантов. Данные о эффективности двух вариантов систем БПЭ приведены в таблице. При их получении использовались такие же исходные данные, как и в рассмотренном выше примере расчета КПД выпрямления.

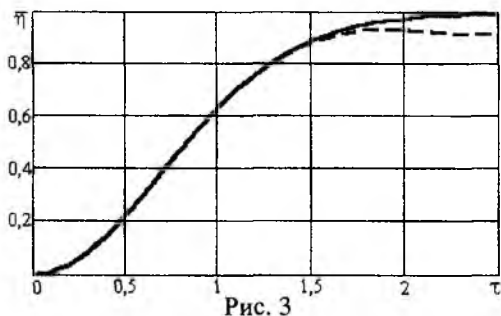


Рис. 3

Виды КПД	Значения КПД для первого/второго вариантов БПЭ при ССМ	
	последовательной	параллельной
$\bar{\eta}$	0,97/0,94	0,97/0,94
η_r	0,83/0,86	0,83/0,86
η_0	0,91/0,97	0,62/0,83
η_Σ	0,73/0,77	0,50/0,66

Из сравнения результатов следует, что и при последовательной, и при параллельной схеме сбора второй вариант предпочтительнее.

Список литературы: 1. Shokalo V.M. Two Ways for Analysis of Power Transmission Systems by a Microwave Beam // Proc. of 4th Ukr.-Russ.-Chin. Symp. on Space Science and Technology. Kiev, 1996. Vol. 2. P. 198–200. 2. Goubau G. On the guided propagation of electromagnetic wave beams / G. Goubau, F. Schwering // IRE Trans. Antennas Propagation. 1961. Vol. AP-9. P. 248–256. 3. Shifrin Y.S. Ways of increase of rectenna efficiency / Y.S. Shifrin, V.M. Shokalo, A.A. Konovaltsev // 46-th Intern. Astronautical Congr. Oslo, Norway, 1995. P. 11. (Prepr. / IAF; 95-R.4.04). 4. Shifrin Y.S. Efficiency of Energy Transmission Systems with Microwave Beam / Y.S. Shifrin, V.M. Shokalo, A.M. Rybalko // Proc. of 5th Intern. Symp. on Recent Advances in Microwave Technology, Sept. 11–16, 1995. Kiev, 1995. P. 242–249. 5. Никифоров А.Ф. Основы теории специальных функций / А.Ф. Никифоров, В.Б. Уваров. М.: Наука, 1974. 304 с. 6. Шокало В.М. Моделирование крупноапертурных ректенн космических энергосистем. 1. Модель крупноапертурной ректенны для расчета КПД выпрямления при соосном расположении передающей и приемной апертур и изменяющейся дальности передачи энергии // Радиотехника. 2001. Вып. 121. С. 3–10. 7. Шокало В.М. Анализ и проектирование схем сбора мощности постоянного тока ректенн. Сообщение 1. КПД схем сбора с последовательным и параллельным соединением приемно-выпрямительных элементов по постоянному току ректенн // Там же. 1993. Вып. 97. С. 67–73.