

ВЛИЯНИЕ ФАЗОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛЯ ВОЗБУЖДЕНИЯ РЕКТЕННЫ НА ЕЕ КПД ВЫПРЯМЛЕНИЯ

Беспроводная передача энергии (БПЭ) СВЧ-лучом положена в основу построения перспективных систем космической энергетики, выполненных по следующей схеме: первичный источник энергии – генератор СВЧ – передающая антенна – трасса распространения СВЧ-луча – ректенна (антенна-выпрямитель) – потребитель. Эффективность систем БПЭ оценивается результирующим КПД, который определяется как произведение парциальных КПД перехвата, выпрямления и сбора мощности постоянного тока [1]. Вопросам разработки методов расчета результирующего КПД посвящен целый ряд работ [1–3], однако данная задача до конца не решена, поскольку до сих пор не изучено влияние фазового распределения поля возбуждения ректенны на ее КПД выпрямления. Частичному устранению этого пробела и посвящена данная работа.

В известные из публикаций формулы расчета амплитудно-фазовых распределений (АФР) полей сфокусированных передающих антенн не входят геометрические размеры приемной апертуры, что не позволяет применить их в случае анализа систем БПЭ. По данной причине первый этап проведенных исследований состоял в выводе удобных для численных экспериментов формул, позволяющих определить АФР по апертуре ректенны. Для этого реальная система БПЭ была упрощена: рассматривались находящиеся в зоне Френеля на расстоянии D две круглые соосные и параллельные апертуры с радиусами R_1 (передающая апертура) и R_2 (апертура ректенны). В данном случае на основании результатов работы [3] можно записать следующее выражение для напряженности электрического поля в плоскости апертуры ректенны при оптимальном (в смысле максимального КПД перехвата [2]) гауссовском поле возбуждения системы БПЭ:

$$E(R, D) = \frac{iR_1}{pR_2} e^{-ikD} e^{-\frac{ikR^2}{D}} \sum_{n=0}^{\infty} A_n \left(\frac{R}{R_2} \right)^{2n}, \quad (1)$$

$$\text{где } A_n = \frac{\tau^n}{2^{n+1} n!} \left[(-1)^n C_n e^{2p\tau} - \frac{1}{p^n} \right]; \quad C_n = \sum_{l=0}^n (-1)^l \frac{(2\tau)^{(n-l)}}{(n-l)! p^l}; \quad p = \alpha + i\beta;$$

$\alpha = -0,225\tau$; $\beta = (D - D_0)R_1 / 2D_0R_2$; $\tau = 2\pi R_1 R_2 / \lambda D$; $k = 2\pi / \lambda$; R – расстояние от центра апертуры ректенны до точки наблюдения поля; D_0 – расстояние фокусировки; λ – рабочая длина волны.

Полученное выражение (1) является корректным (что доказано путем расчета частных примеров, приведенных в [4]) и позволяет по заданному параметру τ и известной геометрии системы БПЭ найти АФР по сечению падающего на ректенну СВЧ-пучка. В качестве примера на рис. 1 представлены данные расчетов амплитудного распределения $F(R/R_2)$ и фазового $\Phi(R/R_2)$ на апертуре ректенны, полученные при следующих исходных данных: $R_1 = R_2 = 200\lambda$; $\tau = 2$; $D = D_0$. Приведенные результаты вполне объяснимы: на апертуре ректенны амплитудное распределение такое же, как и на апертуре передающей антенны (гауссовское), а фазовое изменяется по квадратичному закону.

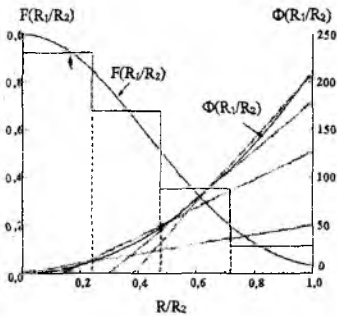


Рис. 1



Рис. 2

Второй этап исследований состоял в разработке подхода к анализу КПД выпрямления крупноапертурных ректенн, возбуждаемых падающим полем с неравномерным гауссовским амплитудным и квадратичным фазовым распределениями. Сложность анализа при таком возбуждении состоит в том, что из-за его неравномерности крупноапертурная ректенна не может быть описана моделью в виде бесконечной периодической решетки. Поэлементный подход также неприемлем в силу большой размерности задачи. Суть предлагаемого упрощения состоит в том, что гауссовское амплитудное распределение по раскрытию крупноапертурной ректенны представляет собой медленно-

меняющуюся функцию координат. В принятом приближении естественно предположить, что характеристики соседних приемно-выпрямительных элементов (ПВЭ) ректенны мало отличаются друг от друга в пределах их зоны взаимодействия. При регулярном расположении ПВЭ это позволяет представить апертуру ректенны в виде ряда секторных зон, в которых размещены равноамплитудно возбуждаемые ПВЭ с одинаковыми параметрами (рис. 2). Следовательно, можно заменить гауссовское амплитудное распределение ступенчатой функцией, а квадратичное фазовое распределение в пределах каждой зоны аппроксимировать линейной функцией (см. рис. 1). В конечном итоге это дает возможность рассматривать апертуру ректенны как совокупность не взаимодействующих периодических решеток ПВЭ, а каждую такую решетку, при определении режима ее работы, анализировать как фрагмент бесконечной периодической антенны с нелинейными элементами.

Изложенная методика была применена к расчету КПД выпрямления ряда ректенн, возбуждаемых неравномерно. Разбивка апертуры на зоны выполнялась таким образом, чтобы каждая из них могла быть описана моделью бесконечной решетки. При этом аппроксимация фазового распределения осуществлялась секущими, исходя из равенства погрешностей аппроксимации на всех участках апертуры (см. рис. 1). Значение линейного фазового сдвига в пределах каждого участка аппроксимации моделировалось при расчетах входных импедансов излучателей ПВЭ изменением угла прихода (см. рис. 2). При сферическом фронте волны взаимное влияние ПВЭ зависит и от азимутального угла. Приблизительно эта зависимость учитывалась путем разбиения апертуры КР на ряд равновеликих по площади секторов. Импеданс излучателей ПВЭ каждого сектора считался постоянным и вычислялся для среднего угла данного сектора. Определенные приближения использовались и при кусочно-постоянной аппроксимации амплитудного распределения. Здесь значение аппроксимирующей функции определялось из равенства перепадов значений квадрата амплитуд поля на левой и правой границах зоны относительно значения этой величины в точке аппроксимации.

Таким образом, в ходе расчетов апертура ректенны представлялась в виде M секторных зон, параметры каждой из которых рассчитывались в приближении бесконечной ректенной решетки по методике [1]. КПД выпрямления всей КР определялся из соотношения

$$\eta_e = \frac{\sum_{l=1}^M \sum_{i=1}^{N_l} P_{0il}}{\sum_{l=1}^M \sum_{i=1}^{N_l} P_{il}}, \quad (2)$$

где N_l – количество ПВЭ в l -й зоне; P_{0il} – мощность постоянного тока

на выходе i -го ПВЭ l -й зоны; P_{il} – максимальная СВЧ-мощность, извлекаемая ПВЭ с номером il из поля падающей волны.

Результаты проведенных расчетов показали существенную зависимость КПД выпрямления от степени неравномерности фазового распределения возбуждающего поля. Так, для одного из вариантов ректенны в результате расчета по методике [1] без учета квадратичного фазового распределения (предполагалось синфазное возбуждение апертуры) получено $\eta_e = 88,9\%$. При учете квадратичного фазового распределения $\eta_e = 83,1\%$. При этом моделировалась ректенна с $R_2 = 200\lambda$ на частоте 2,45 ГГц, ПВЭ которой были нагружены по постоянному току на оптимальное сопротивление. В них также использовались диоды Шоттки с допустимой СВЧ-мощностью 1 Вт, однополупериодные схемы выпрямления с идеальными фильтрами (т.е. считалось, что излучение на частотах гармоник отсутствует). Таким образом, ПВЭ представляли собой расположенные над экраном в узлах квадратной сетки с шагом $0,5\lambda$ резонансные полуволновые вибраторы. В случае наличия синфазной апертуры расчет проводился по методике, описанной в работе [1]; в случае учета влияния квадратичного фазового распределения – по изложенной выше методике. Результаты значительно различаются. Следовательно, подтверждается предположение о том, что для более точного прогнозирования КПД выпрямления крупноапертурных ректенн необходим учет влияния фазового распределения по их апертуре.

Список литературы: 1. *Large-aperture rectenna arrays. Theory and experiment* / A.A. Konovaltsev, A.I. Luchaninov, V.M. Shokalo, A.A. Shcherbina // Space energy and transportation. 1996. N 2–3. P. 66–72. 2. *Goubau G., Shwering F. On the guided propagation of electromagnetic wave beams* // IRE trans. antennas propagation. 1961. Vol. AP-9. P. 248–256. 3. *Shokalo V.M., Rybalko A.M. Optimization and analysis of efficiency of the system of power transmission through microwave beam* // Space energy and transportation. 1996. N 2–3. P. 58–67. 4. *Sherman J. Properties of focused apertures in the fresnel region* // IRE trans. antennas propagation. 1962. Vol. AP-10. P. 399–408.

Харьковский государственный технический
университет радиозлектроники

Поступила в редколлегию 05.12.97