

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

## МОДЕЛИРОВАНИЕ КРУПНОАПЕРТУРНЫХ РЕКТЕНН КОСМИЧЕСКИХ ЭНЕРГОСИСТЕМ

### 3. РАСЧЕТ КПД ВЫПРЯМЛЕНИЯ И СБОРА КРУПНОАПЕРТУРНОЙ РЕКТЕННЫ ПРИ НЕСООСНОМ РАСПОЛОЖЕНИИ ПЕРЕДАЮЩЕЙ И ПРИЁМНОЙ АПЕРТУР

Цель данной статьи – определить методику расчета КПД выпрямления и сбора крупноапертурной ректенны при ее осевом смещении относительно апертуры передающей антенны системы беспроводной передачи энергии (БПЭ). Модель крупноапертурной ректенны для расчета КПД выпрямления при соосном расположении передающей радиуса  $R_1$  и приемной радиуса  $R_2$  апертур описана в [1]. Усовершенствуем эту модель для рассматриваемого случая, выявив его особенности с помощью результатов работы [2]. Здесь показано, что для круглых несоосных апертур системы БПЭ распределение поля в раскрыве ректенны определяется следующим соотношением:

$$\vec{E}(\rho) = \vec{e}_t \frac{jR_1 e^{-jkD} e^{-jk \frac{\rho^2 + 2\rho X_0 \cos\varphi + X_0^2}{2D}}}{R_2 \sqrt{X_0^2 + D^2}} \int_0^{\sqrt{2\tau}} F(u) J_0(\sqrt{2\tau}u) \sqrt{\frac{\rho^2 + 2\rho X_0 \cos\varphi + X_0^2}{R_2^2}} u du, \quad (1)$$

где  $F(u) = e^{-\nu\tau u^2}$  – поле возбуждения передающей антенны;  $\tau = \pi R_1 R_2 / \lambda_0 D$  – число Френеля;  $\nu = 0.225$ ;  $\lambda_0$  – рабочая длина волны,  $D$  – расстояние между апертурами;  $X_0$  – смещение ректенны от соосного положения;  $\varphi$  – азимутальный угол;  $J_0(z)$  – функция Бесселя нулевого индекса.

Из выражения (1) видна отличительная особенность случая несоосных апертур – зависимость амплитуды и фазы поля возбуждения ректенны от азимутального угла  $\varphi$ . Это обстоятельство существенно усложняет задачу расчета КПД выпрямления, так как амплитудно-фазовое распределение (АФР) по апертуре ректенны становится несимметричным.

Для наглядности на рис.1 приведен один из возможных вариантов расположения апертуры ректенны относительно поперечного сечения („пятна”) падающего СВЧ-пучка. Следуя

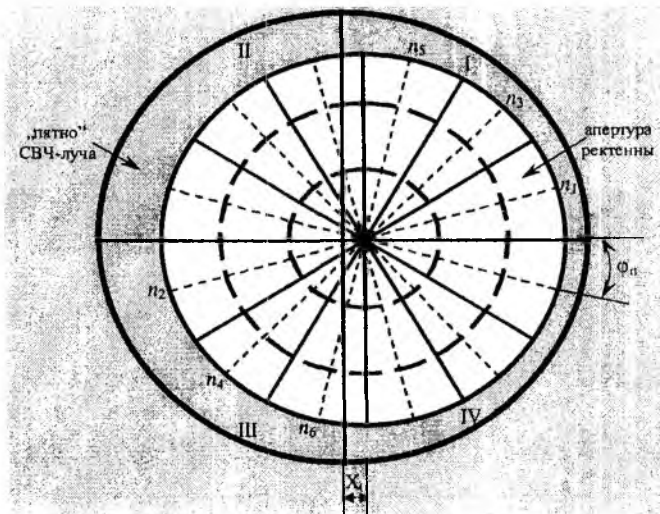


Рис.1

методике [1] апертура ректенны разбита на  $N=N_z N_c$  подрешеток приемно-выпрямительных элементов (ПВЭ), где  $N_z$  – количество кольцевых зон,  $N_c$  – количество равновеликих по площади секторов (на рис.1  $N_z=3$ ,  $N_c=12$ ). При симметричном возбуждении в каждом квадранте имеются рав-

ные по параметрам подрешетки [1]. В рассматриваемом же случае, как следует из рис. 1, имеется только две подрешетки, находящиеся в одинаковых условиях возбуждения (в квадрантах I, IV и II, III). Таким образом, при несимметричном АФР количество расчетов увеличивается в два раза.

Дальнейшие усложнения вычислений сопряжены с тем, что для средних углов каждого сектора двух квадрантов (I, III и II, IV) необходимо рассчитать АФР и провести их аппроксимацию. Поскольку такая операция при симметричном возбуждении выполняется всего один раз, то очевидно, что количество расчетов увеличивается еще в  $N_c/4$  раз.

Для примера на рис. 2 приведены зависимости нормированного амплитудного  $F(\rho/R_2)$  и фазового  $\Phi(\rho/R_2)$  распределений по апертуре ректенны для трех случаев. В первом (рис. 2, а) осью абсцисс является прямая  $n_1 n_2$  (рис. 1), во втором прямая  $n_3 n_4$ , а в третьем – прямая  $n_5 n_6$ , что соответствует средним углам  $\varphi_n$  секторов I и III квадрантов. Кривые АФР рассчитаны при относительном осевом смещении  $X_0=0,4$  для варианта системы БПЭ, описанного в [1]:  $R_1=933\lambda_0$ ,  $R_2=1050\lambda_0$ ,  $D=2,45 \cdot 10^6 \lambda_0$ ,  $\tau=1,257$ .

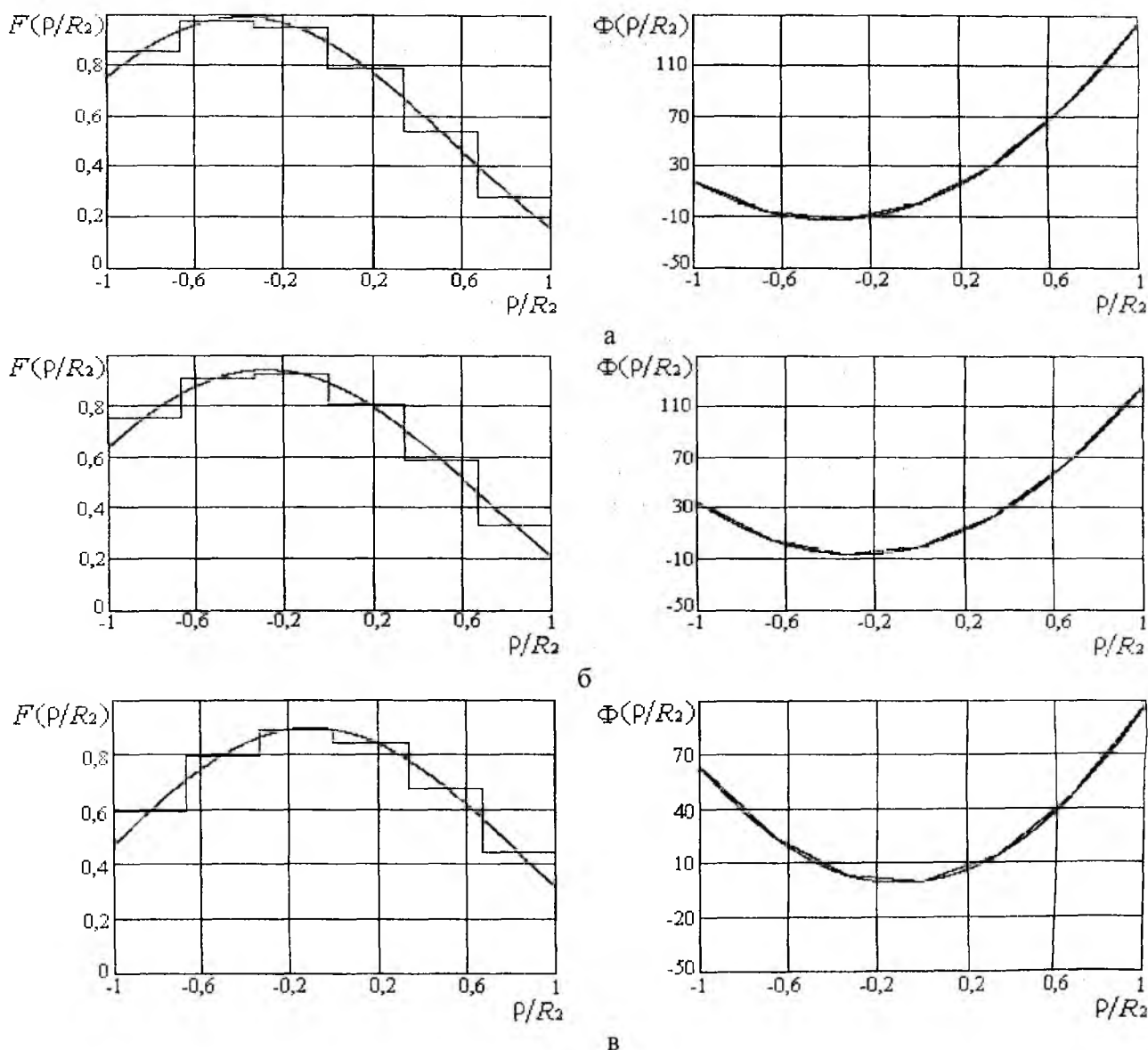


Рис. 2

Таким образом, при вычислении КПД выпрямления и сбора необходимо придерживаться следующего алгоритма:

– по методике [1] апертура ректенны разбивается на  $N_z$  зон и  $N_c$  секторов, границы которых при пересечении образуют  $N=N_z N_c$  подрешеток ПВЭ;

– по формуле (1) определяется АФР всех секторов I и III квадрантов при их средних углах  $\varphi_n$ ;

– с учетом рекомендаций [1] проводится аппроксимация АФР (см. рис.2) и вычисляются конкретные значения амплитуды и фазы поля возбуждения всех подрешеток I и III квадрантов;

– выделяется центральный ПВЭ каждой подрешетки, определяются его координаты и все электродинамические и энергетические параметры в предположении, что каждая подрешетка является бесконечной [3];

– выполняется расчет КПД выпрямления  $\eta$  ректенны по формулам

$$\eta = P_{0m} / P_m,$$

$$P_m = 2 \sum_{i=1}^{N_k} M_i (P_{mi}^{(1)} + P_{mi}^{(3)}),$$

$$P_{0m} = 2 \sum_{i=1}^{N_k} M_i (P_{0mi}^{(1)} + P_{0mi}^{(3)}),$$

где  $P_{mi}^{(1)}, P_{mi}^{(3)}$  – максимальная СВЧ-мощность, извлекаемая центральным ПВЭ  $i$ -той подрешетки, находящейся в I и III квадранте соответственно;

$N_k$  – количество подрешеток в одном квадранте, а  $M_i$  – количество ПВЭ, в  $i$ -той подрешетке;

$P_{0mi}^{(1)}, P_{0mi}^{(3)}$  – мощность постоянного тока на выходе центрального ПВЭ, находящегося в I и III квадранте подрешетки, при условии его работы на согласованную нагрузку;

– при заданной топологии схемы сбора постоянного тока ректенны по методике работы [4] рассчитывается мощность постоянного тока в нагрузке  $P_H$  и КПД сбора

$$\eta_c = P_H / P_0.$$

По указанному алгоритму был проведен сравнительный анализ КПД выпрямления и сбора ректенны при отсутствии и наличии ошибки соосности. Рассматривался тот же пример ректенны, что и в работе [1].

Результаты расчетов входных сопротивлений  $Z$  вибраторов ПВЭ [5-8] приведены в табл. 1.

Таблица 1

№ Зоны	Обозначение прямой на рис. 1	Z, Ом		
		Расчет [1], $X_0=0$	Квадрант I, $X_0=0,4$	Квадрант III, $X_0=0,4$
1	$n_1 n_2$	166,42+j0,057	148,2+j32,634	165,52+j2,8754
	$n_3 n_4$	166,31-j0,2169	162,69+j11,662	166,54-j1,2287
	$n_5 n_6$	165,8+j0,3274	166,19+j0,4854	165,59+j0,24542
2	$n_1 n_2$	173,01-j0,5749	131,43+j52,971	175,39-j36,937
	$n_3 n_4$	170,54-j0,0973	161,56+j23,634	172,52-j15,177
	$n_5 n_6$	168,56-j0,5421	169,56-j0,15961	167,34-j0,85011
3	$n_1 n_2$	185,42-j0,1727	117,22+j68,232	171,75-j77,952
	$n_3 n_4$	179,06-j0,2516	163,87+j34,823	180,13-j30,423
	$n_5 n_6$	172,83+j0,064	171,75-j77,952	171,43-j0,45843

В [1] при  $X_0=0$  вибраторы всех подрешеток были настроены в резонанс ( $\text{Im } Z \approx 0$ ). Как следует из табл.1 при  $X_0 \neq 0$  реактивное сопротивление вибраторов существенно изменяется по знаку и имеет абсолютное значение десятки Ом. Это обстоятельство (расстройка вибраторов) и приводит к снижению КПД выпрямления и сбора (см. табл.2) как при последовательном  $\eta_{\text{с посл}}$ , так и при параллельном  $\eta_{\text{с пар}}$  соединении ПВЭ.

Таблица 2

$X_0=0$	0	0,4
$\bar{\eta}$ , %	84,3	76,9
$\eta$ , %	88,5	79,5
$\eta_{\text{с посл}}$ , %	92,7	88,6
$\eta_{\text{с пар}}$ , %	94	84,4
$\eta_{\Sigma \text{ посл}}$ , %	69,2	54,2
$\eta_{\Sigma \text{ пар}}$ , %	70	51,6

Здесь же в табл.2 приведены рассчитанные по формулам [2] значения КПД перехвата  $\bar{\eta}$  и суммарный КПД  $\eta_{\Sigma \text{ посл}}$ ,  $\eta_{\Sigma \text{ пар}}$  системы БПЭ. Нетрудно видеть, что несоосное размещение апертур передающей антенны и ректенны существенно ухудшает эффективность системы БПЭ.

**Список литературы:** 1. *Шокало В.М. и др.* 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: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. 2001. Вып. 121. С. 3-10. 2. *Шокало В.М. и др.* Моделирование крупноапертурных ректенн космических энергосистем. 2. Расчет коэффициента полезного действия перехвата при несоосном расположении передающей и приемной апертур // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. 2002. Вып. 125. С.3-7. 3. *Лучанинов А.И. и др.* Теоритические и экспериментальные исследования крупноапертурных ректенных решеток // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. 1998. Вып. 106. С. 63-72. 4. *В.М. Шокало* 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 // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. 1993. Вып. 97. С. 67-73. 5. *Лучанинов А.И. и др.* Алгоритм анализа эквидистантной решетки ленточных микрополосковых излучателей произвольной геометрии, адаптированный к расчету крупноапертурных антенн с нелинейными элементами. 1. Модель, описание геометрии и система интегральных уравнений для токов ленточных микрополосковых излучателей сложной геометрии в составе бесконечной решетки // Радиотехника: Всеукр.межвед.науч.-техн.сб. 2001. Вып. 117. С. 78-84. 6. *Лучанинов А.И. и др.* Алгоритм анализа эквидистантной решетки ленточных микрополосковых излучателей произвольной геометрии, адаптированный к расчету крупноапертурных антенн с нелинейными элементами. 2. Решение системы интегральных уравнений // Радиотехника: Всеукр.межвед.науч.-техн.сб. 2001. Вып. 118. С. 3-7. 7. *Лучанинов А.И. и др.* Алгоритм анализа эквидистантной решетки ленточных микрополосковых излучателей произвольной геометрии, адаптированный к расчету крупноапертурных антенн с нелинейными элементами. 3. Особенности численной реализации алгоритма // Радиотехника: Всеукр.межвед.науч.-техн.сб. 2001. Вып. 119. С. 199-210. 8. *Лучанинов А.И. и др.* Алгоритм анализа эквидистантной решетки ленточных микрополосковых излучателей произвольной геометрии, адаптированный к расчету крупноапертурных антенн с нелинейными элементами. 4. Результаты решения тестовых задач // Радиотехника: Всеукр.межвед.науч.-техн.сб. 2001. Вып. 120. С. 8-11.

Харьковский национальный  
университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 17.05.2002