

А.И. ЛУЧАНИНОВ, д-р физ.-мат. наук, В.М. ШОКАЛО, д-р техн. наук,
А.А. КОНОВАЛЬЦЕВ, канд. техн. наук

ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРИЕМНО-ВЫПРЯМИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КРУПНОАПЕРТУРНЫХ РЕКТЕНН

Ректенна (антенна-выпрямитель) является оконечным устройством систем беспроводной передачи энергии с помощью СВЧ-луча. По своему устройству ректенна — это антенная решетка, состоящая из отдельных приемно-выпрямительных элементов (ПВЭ). Ее функция заключается в приеме энергии СВЧ-луча и преобразовании ее в энергию постоянного тока. В случае беспроводной передачи значительного количества энергии требуется строить ректенны из очень большого числа ПВЭ (до нескольких миллионов), а ректенная решетка имеет большие электрические размеры, т.е. является крупноапертурной.

Ниже представлены результаты численных исследований энергетических характеристик ПВЭ крупноапертурных ректенных решеток, возбуждаемых равноамплитудно. Ранее подобные характеристики изучались только для случая уединенных ПВЭ [1]. Излагаемые здесь результаты получены с помощью методики анализа крупноапертурных ректенн [2], базирующейся на приближении бесконечной решетки. Для проведения расчетов использовались описанные в работе [3] методики и комплекты программ, которые позволяют определить в приближении бесконечной решетки все электродинамические характеристики ленточных полосковых вибраторов сложной конфигурации, расположенных на многослойной подложке, и энергетические характеристики антенн с нелинейными элементами (выпрямительными диодами).

При расчетах выпрямительный диод (диод Шоттки) представлялся в виде резистивной нелинейности. Предполагалось, что реактивные элементы диода входят в состав линейной части схемы ПВЭ. Вольт-амперная характеристика нелинейности описывалась выражением

$$i = I_s \left(e^{\alpha U} - 1 \right), \quad (1)$$

где i — сила тока через диод; I_s — сила тока насыщения; α — постоянный коэффициент; U — напряжение на переходе.

В табл. 1 приведены характеристики типовых диодов Шоттки, различающихся допустимыми значениями входной мощности P_D , силы прямого тока I_D и обратного напряжения U_D .

Т а б л и ц а 1

Вариант	Диод	P_D , Вт	I_D , В	U_D , В	I_s , А	α
1	2A204A	0,2	—	—	$1,066 \cdot 10^{-5}$	8,55
2	3A208A	0,5	50	20	$2,972 \cdot 10^{-4}$	3,69
3	Опытный	1,0	100	40	$2,506 \cdot 10^{-10}$	23,03

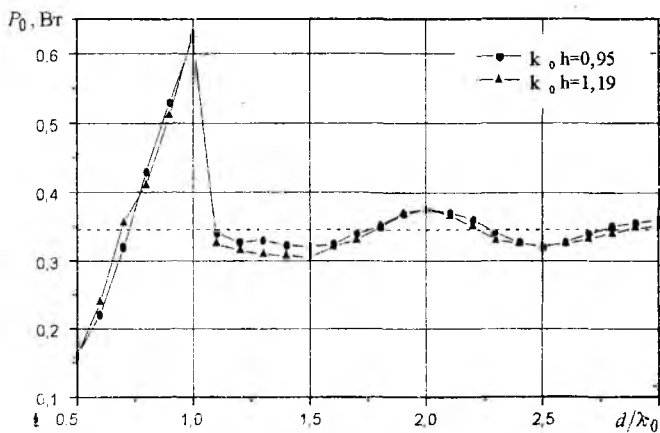
Первоначально были выполнены исследования однополупериодного ПВЭ с идеальными входным и выходным фильтрами (потери и побочное излучение отсутствуют). Такое приближение позволяет рассмотреть предельные возможности ПВЭ по КПД в крупноапертурных ректеннах. Предполагалось, что ПВЭ выполнен на базе резонансного полуволнового вибратора, расположенного над экраном на подложке с относительной диэлектрической проницаемостью ϵ_r на высоте $k_0 h$, где $k_0 = 2\pi/\lambda_0$, $\lambda_0 = 12,25$ см.

Косвенным подтверждением достоверности предложенной в работе [2] методики расчета являются зависимости (рис. 1) мощности постоянного тока P_0 и оптимального сопротивления нагрузки $R_{н.опт}$ ПВЭ от шага α решетки с ячейкой квадратной формы. Пунктиром нанесены аналогичные параметры уединенного ПВЭ. Значения P_0 существенно зависят от шага решетки и при его увеличении асимптотически приближаются к значению мощности постоянного тока уединенного ПВЭ. Рассчитанные зависимости $P_0 = P_0(d/\lambda_0)$ качественно повторяют зависимость для КПД элемента периодической антенной решетки [4], и их ход, прежде всего, предопределяется ходом кривых входного сопротивления излучателя $R_a = R_a(d/\lambda_0)$, которое для ПВЭ с идеальными фильтрами удовлетворяет соотношению $R_{н.опт} = 2R_a$ [5].

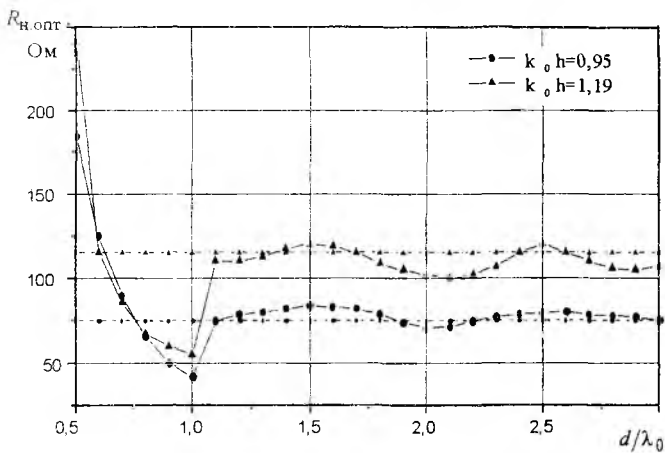
Описанные результаты получены для случая использования диодов Шоттки с $P_D = 1$ Вт и диэлектрической подложки с $\epsilon_r = 1$. Для других значений ϵ_r качественная картина остается такой же, только эффективность ПВЭ снижается. Расчеты показали, что в практических конструкциях ректенны нецелесообразно применять подложки с большим значением ϵ_r , поскольку с ростом ϵ_r уменьшается ЭДС холостого хода $e_{х.х}$, наводимая на клеммах вибратора:

ε_r	1	1,5	2	3
$e_{x,x}, \text{В}$	0,585	0,529	0,502	0,438

Следовательно, растут потери на внутреннем сопротивлении выпрямительного диода. Динамика изменения $e_{x,x}$ соответствуют плотности потока падающей мощности $\Pi = 0,089 \text{ Вт/м}^2$; $d/\lambda_0 = 0,5$ и $k_0 h = 1,1938$.



а



б

Рис. 1

Рассмотрим теперь динамические характеристики ПВЭ, т.е. зависимость энергетических параметров ПВЭ от уровня входного воздействия. Вычисления выполнялись для трех вариантов ПВЭ, в которых использовались выпрямительные диоды с различными значениями допустимой мощности P_d (см. табл. 1). Расчетные зависимости КПД выпрямителя ПВЭ η от нормированной плотности потока мощности $\bar{P} = P/P_d$, падающей на ректенну, показаны на рис. 2. Под P_d (табл. 2) понимается значение плотности потока мощности, при котором входная мощность $P_{вх} = P_d$.

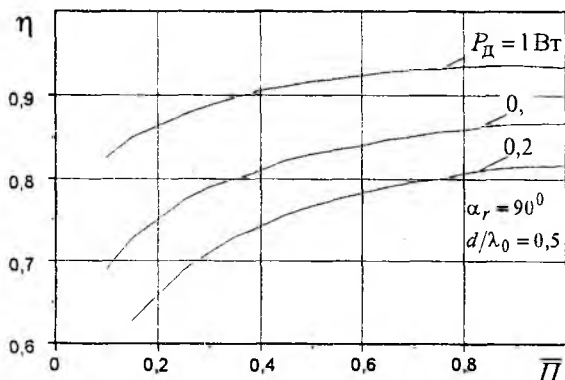


Рис. 2

Таблица 2

Вариант	P_d , Вт	P_d , Вт	η_{\max} , %	μ
1	0,2	52	83,7	0,142
2	0,5	131	89,7	0,121
3	1,0	275	94,8	0,053

Зависимости $\eta(\bar{P})$ достаточно точно аппроксимируются степенной функцией

$$\eta = \eta_{\max} \bar{P}^\mu, \quad (2)$$

где η_{\max} — значение η при $\bar{P} = P_d$; μ — коэффициент, характеризующий степень нелинейности зависимости (2). Значения η_{\max} и μ приведены в табл. 2. Из представленных данных следует, что с увеличением \bar{P} КПД выпрямления растет по нелинейному закону, причем наиболее

близка к линейной зависимости $\eta(\Pi)$, если в ПВЭ используется диод Шоттки с наибольшим значением P_d .

Еще одна динамическая характеристика ПВЭ $P_{вх} = P_{вх}(\Pi)$ дана на рис. 3. Из представленных здесь графиков вытекает, что в случае перехода от квадратной (угол наклона сетки решетки $\alpha_r = 90^\circ$) к треугольной ($\alpha_r = 60^\circ$) форме ячейки или с уменьшением ее шага растет значение плотности потока мощности, при котором $P_{вх} = P_d$. Данный результат является естественным, так как уменьшение угла α_r или шага по ее осям приводит к сокращению площади ячейки, т.е. к более плотному размещению ПВЭ по апертуре ректенны. В свою очередь, более плотное размещение ПВЭ предопределяет рост СВЧ-мощности, которую может извлечь ректенна из свободного пространства без выгорания диодов, а следовательно, и увеличение удельной мощности постоянного тока \bar{P}_s , снимаемой с единицы площади апертуры (табл. 3).

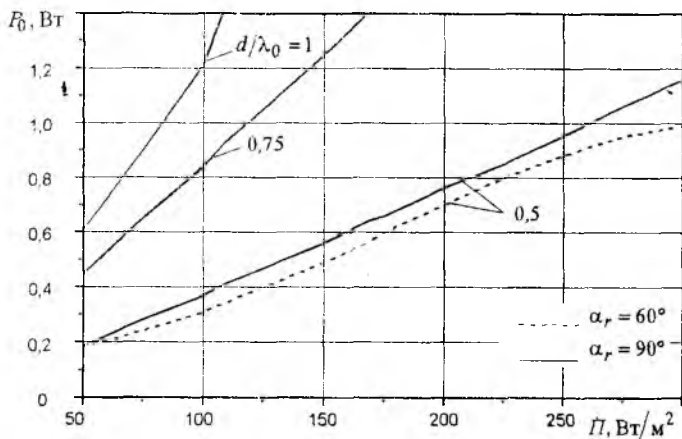


Рис. 3

В табл. 3 приведены максимально возможные значения \bar{P}_s , которые для равноамплитудно возбуждаемой апертуры могут быть вычислены таким образом: $\bar{P}_s = \Pi_d \Delta S_{эфф} / \Delta S$, где $\Delta S_{эфф}$, ΔS — эффективная и геометрическая площади ячейки решетки. Здесь же представлены R_a , $e_{х.х}$, Π_d , при которых вычислялись значения удельной мощности \bar{P}_s .

$d_x \times d_l$	$R_a, \text{ Ом}$	$e_{x,x}, \text{ В}$	$P_d, \text{ Вт/м}^2$	$\bar{P}_s, \text{ Вт/м}^2$
$(0,5 \times 0,5)\lambda_0$	93,7	27,5	269,0	250,4
$(0,5 \times 0,4)\lambda_0$	118,0	31,0	339,6	295,5
$(0,5 \times 0,3)\lambda_0$	160,5	36,0	448,9	421,5
$(0,5 \times 0,25)\lambda_0$	195,3	40,0	546,0	508,1

Результаты свидетельствуют о том, что, варьируя площадь ячейки, можно довольно существенно изменять параметры R_a и $e_{x,x}$, т.е. регулировать в широких пределах характеристики ПВЭ как эквивалентного генератора постоянного тока. Это весьма важно при создании ректенн с высоким КПД. Таким образом, по сравнению с уединенным ПВЭ, в ректенной решетке за счет дополнительных степеней свободы (размеры и форма ячейки) существуют более широкие возможности управления параметрами как отдельных ПВЭ, так и ректенны в целом.

Рассмотрим теперь факторы, влияющие на характеристики направленности ректенны на основной частоте. В связи с тем что ректенна является нефазированной антенной решеткой, ее характеристики направленности при эквидистантной структуре полностью определяются свойствами одного ПВЭ. Под диаграммой направленности (ДН) ректенны на основной частоте будем понимать зависимость КПД выпрямления ПВЭ от угловых координат при неизменных плотностях потока падающего СВЧ-поля и нагрузках по постоянному току. Угловые зависимости КПД ПВЭ, посчитанные при $P_d = 1 \text{ Вт}$, $\mu = 0,053$, $R_H = R_{H,\text{опт}}$ в E - и H -плоскостях, изображены на рис. 4. Здесь кривые 1 соответствуют шагу квадратной решетки $d = 0,5\lambda_0$, а кривые 2 – $d = \lambda_0$. Так же, как и в обычной антенне, ДН ректенны зависит от шага решетки. В значительном секторе углов (примерно $\pm 40^\circ$ от нормали) наблюдаются слабые изменения КПД, причем менее заметное уменьшение КПД характерно для ректенной решетки с меньшим шагом. В целом на основании полученных данных, пользуясь общепринятой в технике антенн терминологией, можно охарактеризовать ректенные решетки как слабонаправленные. Приведенные результаты полностью коррелируют с экспериментальными данными работы [6]. Особенностью ДН ректенны является ее зависимость от степени нелинейности динамической характеристики (2). Как видно из анализа кривых 3 на рис. 4 (условия расчета: $P_d = 0,2$; $\mu = 0,142$; $d/\lambda_0 = 0,5$; $R_H = R_{H,\text{опт}}$), с увеличением μ

от 0,053 до 0,142 форма ДН в плоскостях E и H существенно изменяется. Чем сильнее нелинейность, тем резче спад КПД и заметнее сужение ДН.

Качественные изменения ДН наступают и в случае варьирования сопротивления нагрузки. Этот вывод следует из совместного рассмотрения кривых 1 и 4 на рис. 4, а. Кривая 4 рассчитана при тех же условиях что и кривая 1, но значение R_H принималось равным $0,5 R_{H, \text{опт}}$. В этом случае ДН в секторе углов до 40° становится более гладкой, но имеет уже два максимума в направлениях $\pm 20^\circ$ при меньшем абсолютном значении КПД выпрямления.

К снижению КПД ПВЭ (кривая 5 на рис. 4, а) приводит и наличие высших гармоник. ДН с учетом генерации высших гармоник рассчитана при $P_d = 1$ Вт, $R_H = R_{H, \text{опт}}$ и отсутствии входного фильтра низких частот.

Значения параметров трех вариантов ПВЭ без входных фильтров приведены в табл. 4. Здесь же для сравнения в скобках указаны параметры ПВЭ с идеальными фильтрами

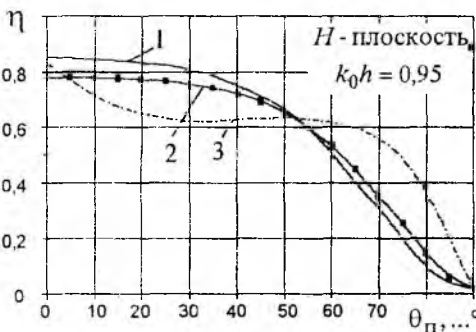
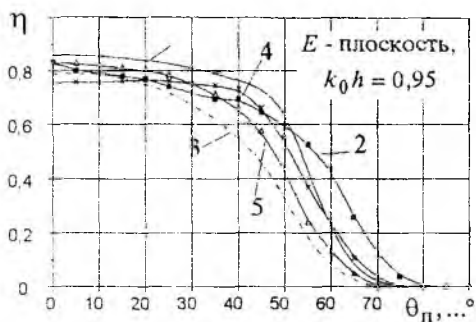


Рис. 4

Вариант	$R_{н,опт}, \text{ Ом}$	η	$\xi(2f_0), \text{ дБ}$	$\xi(3f_0), \text{ дБ}$	$\xi(4f_0), \text{ дБ}$
1	127 (187)	0,772 (0,799)	-17,0	-24,2	-36,8
2	120 (187)	0,756 (0,783)	-16,8	-24,0	-36,6
3	117 (187)	0,807 (0,860)	-17,3	-24,7	-37,1

Под $\xi(nf_0)$ в табл. 4 понимается уровень излучения n -й гармоники, равный отношению мощности излучения этой гармоники $P_{\Sigma}(nf_0)$ к входной мощности $P_{вх}$.

Таким образом, проведены численные исследования зависимостей характеристик ПВЭ как элемента бесконечной периодической антенной решетки с нелинейными элементами от параметров решетки. Показано, что энергетические характеристики такого элемента существенно отличаются от характеристик уединенного ПВЭ и асимптотически приближаются к последним при увеличении шага решетки. Получены качественные оценки параметров ПВЭ на современных диодах Шоттки. Выработано несколько полезных для практики рекомендаций:

— КПД выпрямления, допустимую плотность потока СВЧ мощности на апертуре и удельную поверхностную мощность постоянного тока ректенн можно увеличить путем уменьшения площади ячейки, либо уменьшения шага, либо изменения угла наклона косоугольной сетки;

— в ректенных решетках в качестве сплошных подложек не следует применять материалы с большой диэлектрической проницаемостью, так как это приводит к ощутимому снижению КПД выпрямления; при больших значениях диэлектрической проницаемости апертуру ректенны целесообразно строить по принципу взвешенной подложки.

Изучено влияние степени нелинейности характеристик диодов Шоттки на параметры ПВЭ в составе бесконечных периодических ректенных решеток. Установлено следующее:

— нелинейные зависимости КПД ректенны от плотности потока мощности поля возбуждения с достаточной точностью аппроксимируется степенной функцией, скорость нарастания которой определяется свойствами выпрямляющего диода;

— наличие высших гармоник вызывает снижение КПД, изменение оптимального сопротивления нагрузки и появление поля побочного излучения довольно значительного уровня, для ослабления которого следует применять фильтрующие схемы;

— нелинейные эффекты существенно влияют на форму ДН ректенны по КПД выпрямления; усиление нелинейности динамической характеристики ПВЭ и появление побочного излучения приводит к тому, что спад КПД при росте угла прихода электромагнитной волн происходит более резко и диаграмма направленности сужается.

Список литературы: 1. Шифрин Я.С., Лучанинов А.И., Шокало В.М. Приемно-выпрямительные элементы ректенных систем. Х., 1988. 181 с. Деп. в УкрНИИНТИ 20.02.89, № 1626 -Ук89. 2. Теоретические и экспериментальные исследования крупноапертурных ректенных решеток / А.И. Лучанинов, В.М. Шокало, А.А. Коновальцев и др. // Радиотехника. 1998. Вып. 106. С. 63 — 72. 3. Анализ характеристик периодической решетки узких микрополосковых излучателей сложной конфигурации / А.И. Лучанинов, В.М. Шокало, С.В. Толстова и др. // Проектирование автоматизированных систем контроля и управления сложными объектами: 4-я Всесоюз. шк., Харьков — Туапсе, 1990 г.: Тез. докл. X., 1990. С. 43. 4. Вендик О.Г. Антенны с немеханическим движением луча (введение в теорию). М.: Сов. радио, 1965. 360 с. 5. Егоров А.Н. К расчету КПД элемента ректенны // Антенны. М., 1986. Вып. 33. С. 88 — 94. 6. Ремизов Б.А., Классен В.И., Шишлов А.В. Выпрямительные антенны // Зарубеж. радиоэлектроника. 1980. № 5. С. 79 — 89.

*Харьковский государственный технический
университет радиоэлектроники*

Поступила в редколлегию 18.09.98