

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

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КРУПНОАПЕРТУРНЫХ РЕКТЕННЫХ РЕШЕТОК

Беспроводная передача энергии (БПЭ), как одна из многообещающих альтернатив существующим способам энерготранспортировки, привлекает все большее внимание специалистов во всем мире. Это обусловлено наличием огромного потенциала у данного способа передачи энергии для решения глобальных энергетических проблем человечества. В частности, создание эффективных систем БПЭ позволит получить доступ к практически неиссякаемым запасам солнечной энергии в космосе, что, в свою очередь, будет являться необходимым энергетическим базисом для освоения человечеством ближнего и дальнего космоса.

Наиболее перспективными системами БПЭ в настоящее время считаются системы передачи энергии с помощью СВЧ-луча (СПЭСЛ). В развитии именно этого вида систем БПЭ достигнуты наибольшие успехи, о которых позволяют судить ряд успешных демонстрационных экспериментов и проведение интенсивных исследований возможностей промышленного применения СПЭСЛ практически во всех развитых странах мира. Однако, несмотря на определенные успехи в построении эффективных СПЭСЛ, в целом эта задача еще далека от окончательного решения.

Данная статья посвящена вопросам теоретического и экспериментального исследования КПД окончного устройства СПЭСЛ — ректенны (антенны-выпрямителя). Ректенна представляет собой антенную решетку из отдельных приемно-выпрямительных элементов (ПВЭ), ее функция заключается в приеме энергии, переносимой СВЧ-лучом, и преобразовании в энергию постоянного тока. В мощных СПЭСЛ ректенны содержат очень большое количество ПВЭ (до нескольких сотен тысяч и даже более) и имеют большие электрические размеры, т.е. являются крупноапертурными. Именно такие ректенны и рассматривается нами далее.

Ректенны принадлежат к классу антенн с нелинейными элементами (АНЭ), и для их анализа необходимо применять подходы, разработанные в теории АНЭ. Для решения рассматриваемой задачи очень часто применяется подход с использованием переменных состояния. Анализируемая антенна описывается системой уравнений состояния и системой внешних

уравнений [1]. В качестве переменных состояния выбирают такой набор сил токов и (или) напряжений, который позволяет определять режим работы схемы. Задача анализа разбивается на два этапа. Первый этап — это выбор уравнений состояния, т.е. нахождение условий функционирования АНЭ. На втором этапе определяются внешние характеристики антенны (диаграмма направленности, КПД и т.д.) с учетом параметров схемы, входных воздействий и результатов установления режима функционирования АНЭ. Однако непосредственное применение разработанных ранее методов к анализу крупноапертурных ректенн оказалось неэффективным вследствие больших вычислительных затрат. Вот почему необходимо разрабатывать новые методы анализа, учитывающие, в частности, особенности этого типа АНЭ:

— большое число ПЭВ, которые, в общем случае, расположены по апертуре ректенны произвольно;

— неравномерное распределение поля возбуждения по апертуре ректенны, создаваемое для обеспечения высокого КПД перехвата энергии СВЧ-луча.

Далее описан один из методов анализа крупноапертурных ректенн.

Теоретический анализ параметров ректенны

Первоначально для разработки метода анализа крупноапертурной ректенны с неравноамплитудным возбуждением была рассмотрена задача равноамплитудного возбуждения ректенны с идентичными ПЭВ, излучатели которых размещены в узлах ректенной решетки эквидистантно. Предполагалось, что решетка является косоугольной с двойной периодичностью вдоль осей x и l (рис. 1). Шаг решетки вдоль оси x равен d_x , а вдоль оси l — d_l . Ось l образует угол α_r с осью x . Решетка возбуждается на частоте ω_0 (длина волны λ_0) плоской электромагнитной волной, падающей из направления θ_{Π} , φ_{Π} . Вектор напряженности электрического поля возбуждающей плоской волны в точке (x, y, z)

$$\vec{E}_{\Pi} = \vec{E}_0 \exp(jk_0)(x \sin \theta_{\Pi} \cos \varphi_{\Pi} + y \sin \theta_{\Pi} \sin \varphi_{\Pi} + z \cos \theta_{\Pi}), \quad (1)$$

где $k = 2\pi/\lambda_0$.

Достаточно общая схема, позволяющая описывать различные типы ректенных решеток, дана на рис. 2. Она состоит из нелинейного многополосника (НМ) и линейного многополосника (ЛМ). Последний показан на рис. 2 пунктирной линией. В свою очередь, ЛМ состоит из многополосника ЛМ-1, соответствующего системе излучателей, и многополосника ЛМ-2, поставленного в соответствие схеме сбора мощности и нагрузке

ректенны. Многополосник ЛМ-3 включает в себя все остальные линейные элементы, которые можно выделить из каждого ПВЭ. Такое деление схемы крупноапертурной ректенны на многополосники позволяет формировать модели различного уровня строгости в зависимости от требуемого обоснования и точности получаемых результатов. В то же время это деление обусловлено различием в методах описания характеристик линейных и нелинейных элементов, входящих в схему ректенны.

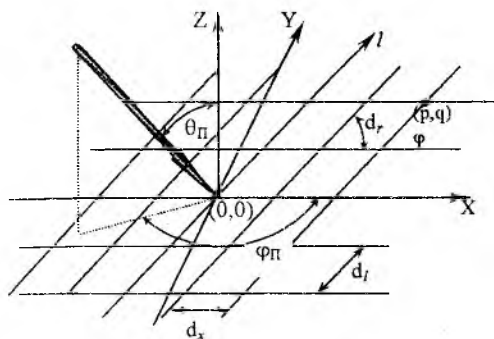


Рис. 1

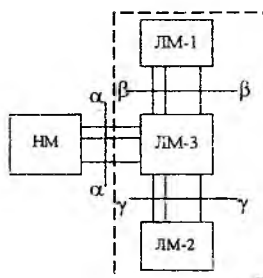


Рис. 2

Для описания нелинейных элементов используют, как правило, временные зависимости сил токов и напряжений на их выходах. В этом случае нелинейный многополосник ректенны описывается отображением R , трансформирующим вектор напряжений $u_n(t)$ на его входах в вектор сил токов $i_n(t)$:

$$i_n(t) = R(u_n(t)). \quad (2)$$

В отличие от нелинейных, линейные многополосники ректенны описываются в частотной области. На первом этапе анализа (при определении режима функционирования ректенны) достаточно описывать ЛМ только со стороны входов, которые подключены к нелинейному многополоснику (сечение $\alpha - \alpha$). Это означает, что для линейного многополосника достаточно знать его матрицу собственных и взаимных сопротивлений $Z_{\alpha\alpha}(\omega)$ и вектор комплексных амплитуд ЭДС $e_{\alpha\alpha}(\omega)$, определенных относительно сечения $\alpha - \alpha$. Так как ректенна имеет большие размеры, то будем полагать, что для определения режима ее работы возможно применить приближение бесконечной решетки. Это означает, что процедура нахождения режима работы совокупности ПВЭ ректенны сводится к определению режима работы одного ПВЭ, входящего в состав бесконечной периодиче-

ской решетки из одинаковых элементов. В этом случае матрица $Z_{\alpha\alpha}(\omega)$ представляет собою блочно-блочную теплицеву матрицу, а вектор $e_{\alpha\alpha}(\omega)$ является бесконечномерным вектором, элементы которого удовлетворяют соотношению

$$e_{\alpha\alpha}^{(p,q)}(\omega) = e_{\alpha\alpha}^{(0,0)}(\omega) \exp j(ap + bq), \quad (3)$$

где $e_{\alpha\alpha}^{(p,q)}(\omega)$, $e_{\alpha\alpha}^{(0,0)}(\omega)$ — векторы комплексных амплитуд ЭДС, образуемые полем падающей волны и определенные относительно сечения $\alpha - \alpha$ ПВЭ, расположенных в ячейках с номерами (p, q) , $(0, 0)$ соответственно; $a = k_0 d_x \sin\theta_n \cos\varphi_n$; $b = k_0 d_l (\sin\theta_n \cos\varphi_n \cos\alpha_r + \sin\theta_n \cos\varphi_n \sin\alpha_r)$. Это позволяет определить временную зависимость для вектора ЭДС:

$$e_{\alpha\alpha}^{(p,q)}(t) = e_{\alpha\alpha}^{(p,q)} [t + (a/\omega)p + (b/\omega)q]. \quad (4)$$

Таковыми являются общие свойства матриц всех линейных многополюсников и векторов ЭДС на их входах. Можно показать [2], что использование указанных выше свойств матрицы $Z_{\alpha\alpha}(\omega)$ и вектора $e_{\alpha\alpha}(\omega)$ позволяет записать уравнение состояния ректенны в следующем виде:

$$I_0^{(0,0)} + \frac{1}{2} \sum_{n=-\infty}^{\infty} I_n^{(0,0)} \exp(jn\omega_0 t) + R \left\{ \tilde{Z}(0) I_0^{(0,0)} + \frac{1}{2} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \tilde{Z}(n\omega_0) I_n^{(0,0)} \exp(jn\omega_0 t) + e_{\alpha\alpha}^{(0,0)}(t) \right\} = 0, \quad (5)$$

$$\forall t \in [0, T],$$

Здесь $\tilde{Z}(n\omega_0) = \sum_{k,l=-\infty}^{\infty} Z_{k,l}(n\omega_0) \exp[jn(ak + bl)]$, где $Z_{k,l}(n\omega_0)$ — вектор,

образованный элементами нулевой строки матрицы $Z_{\alpha\alpha}(\omega)$; $I_n^{(0,0)}$ — вектор, состоящий из комплексных амплитуд сил токов n -й гармоники на входах линейного многополюсника, которые соответствуют ПВЭ, расположенным в ячейке с номером $(0, 0)$; штрих около знака суммы означает, что суммирование осуществляется для всех слагаемых, за исключением тех, для которых $n = 0$.

Уравнение (5) показывает, что с учетом упомянутых выше особенностей матрицы ЛМ и системы источников возбуждения анализ схемы на рис. 2 сводится к анализу схемы, состоящей из одного нелинейного много-

полосника, описываемого выражением (2), и одного линейного многополосника, матрица полных сопротивлений которого определена для частот всех гармоник и равна $\tilde{Z}(n\omega_0), \forall n \in [-\infty, \infty]$. Для анализа этой схемы необходимо решить систему уравнений $m(2N+1)$ -го порядка (N — число удерживаемых в процессе вычислений гармоник сил токов; m — число входов нелинейного многополосника). Векторы n -й гармоники силы тока для ячеек с номерами (p, q) , которые требуются для вычисления внешних параметров ректенны, определяются выражением

$$I_n^{(p,q)} = I_n^{(0,0)} \exp[jn(ap + bq)]. \quad (6)$$

Следовательно, нахождение решения уравнений состояния (определение режима) крупноапертурной ректенны при условии равноамплитудного возбуждения сводится к нахождению решения системы для одного ПВЭ в составе бесконечной решетки, что, в свою очередь, позволяет построить эффективный метод анализа ректенн с применением существующих алгоритмов и программ для анализа одиночного ПВЭ.

Второй этап анализа заключается в определении требуемых внешних параметров. Наиболее важными из них являются: мощность постоянного тока, поглощаемая многополосником нагрузки; КПД; напряженность поля, переизлучаемого на частотах высших гармоник. Исходными данными для вычислений на втором этапе служат: частота ω_0 ; вектор напряженности электрического поля плоской возбуждающей волны $\vec{E}_n(\omega_0, \theta_n, \varphi_n)$; вектор комплексных амплитуд сил токов $I_n^{(p,q)} \forall (-N \leq n \leq N)$, получаемый при нахождении решения уравнений состояния; параметры линейных многополосников схемы. К параметрам многополосников относятся:

— матрица $S(n\omega_0)$, объединяющая амплитуды падающей и отраженной волн на входах системы излучателей (ЛМ-1);

— система парциальных диаграмм направленности системы излучателей ректенны $\vec{f}(n\omega_0, \theta, \varphi)$;

— матрица $S_n(n\omega_0)$, объединяющая амплитуды падающей и отраженной волн на входах многополосника нагрузки (ЛМ-2);

— матрица $Q(n\omega_0)$, объединяющая амплитуды падающей и отраженной волн в сечении $\beta - \beta$ и сечении $\gamma - \gamma$ многополосника ЛМ-3, а также силы токов напряжения в сечении $\alpha - \alpha$ этого же многополосника.

Вычисление внешних характеристик осуществляется в несколько этапов. Во-первых, по заданным амплитудам падающих волн $a_{\beta\beta}(n\omega_0)$,

$a_{\gamma\gamma}(n\omega_0)\rangle$ в сечениях $\beta-\beta$ и $\gamma-\gamma$ многополосника ЛМ определяется вектор $I_n^{(p,q)}$, при этом используются правила объединения [3] и параметры многополосников ЛМ-1, ЛМ-2, ЛМ-3. Затем отыскиваются требуемые параметры.

Мощность постоянного тока, поглощаемая многополосником нагрузки, вычисляется по формуле

$$P_0 = \langle a_{\gamma\gamma}(\omega)(E - S'_n(\omega))a_{\gamma\gamma}(\omega) \rangle_{\omega \rightarrow 0}. \quad (7)$$

КПД ректенны определяется как отношение мощности P_0 к максимальному значению мощности P_M , которая может быть извлечена системой излучателей ректенны из падающего поля при работе на согласованный многополосник:

$$\eta = \frac{P_0}{P_M} = \frac{8P_0}{\langle e_x(\omega_0, \theta_n, \varphi_n) R^{-1} e_x(\omega_0, \theta_n, \varphi_n) \rangle}. \quad (8)$$

Напряженность электрического поля, переизлучаемого на частоте n -й гармоники в направлении (θ, φ) , находится из соотношения

$$\vec{E}(n\omega_0, \theta, \varphi) = \sqrt{2W_0} \langle a_{\beta\beta}(\omega_0) [E - S(n\omega_0)] \vec{f}(n\omega_0, \theta, \varphi) \frac{\exp(-jkr)}{r}. \quad (9)$$

В выражениях (7) — (9) E — единичная матрица; $e_x(\omega_0, \theta_n, \varphi_n) = (j\lambda_0 / \sqrt{2W_0}) [\vec{E}_n(\omega_0, \theta_n, \varphi_n) \vec{f}^*(\omega_0, \theta_n, \varphi_n)]$ — вектор ЭДС, наведенных полем $\vec{E}_n(\omega_0, \theta_n, \varphi_n)$ на входах схемы; R — действительная часть матрицы собственных и взаимных сопротивлений системы излучателей; W_0 — волновое сопротивление свободного пространства. Индекс t соответствует операции транспозиции, а $*$ — операции комплексного сопряжения.

Таким образом, приведена последовательность анализа ректенны при условии равноамплитудного возбуждения. Теперь вкратце рассмотрим особенности анализа ректенны при условии неравноамплитудного ее возбуждения.

Как упоминалось ранее, для обеспечения высокого КПД апертура ректенны возбуждается неравномерно и может быть образована неоднотипными ПВЭ, размещенными неравномерно. Однако во всех известных существующих и разрабатываемых конструкциях ректенн используется равномерное размещение ПВЭ по всей апертуре либо в пределах заданных ее частей. Главное упро-

шение, применяемое для анализа неравномерно возбуждаемых ректенн, состоит в ступенчатой аппроксимации неравноамплитудного возбуждающего поля. Это позволяет представить апертуру ректенны в виде набора зон; внутри каждой из них размещение ПВЭ предполагается равномерным, а возбуждение зоны — равноамплитудным. В итоге ректенна рассматривается в виде набора эквидистантных решеток из ПВЭ с равноамплитудным возбуждением. Для определения режима работы каждой такой решетки используется приближение бесконечной решетки, упоминавшееся выше. После вычисления амплитуд сил токов нелинейных элементов для всех решеток формируется вектор сил токов для всей ректенны и в соответствии с выражениями (7)—(9) определяются внешние параметры.

Результаты экспериментов

Достоверность предложенного метода анализа параметров ректенн в однородном и неоднородном полях проверялась экспериментально. Измерительная установка состояла из передатчика мощностью 600 Вт на рабочей частоте 2,45 ГГц, передающей параболической антенны диаметром 0,9 м и ректенны. Апертура ректенны имела квадратную форму с габаритным размером 0,7 м и была набрана из девяти модулей (3×3). Схема одного модуля представлена на рис. 3. В состав модуля входит 16 ПВЭ (восемь параллельно включенных по постоянному току линеек, в каждой из которых два ПВЭ соединены последовательно). Элементы модуля располагались в узлах решетки с треугольной сеткой ($d_x = 60$ мм, $d_y = 66$ мм). В качестве элемента модуля был выбран петлевой вибратор резонансных размеров над экраном со встречно включенными в его рассечки диодами 3A208A, имеющими допустимую мощность 0,5 Вт и вольт-амперную характеристику вида

$$i = 10^{-12} [\exp(3,69U) - 1],$$

где i — сила тока через диод; U — напряжение на его переходе.

Платы модулей изготавливались из фольгированного стеклотекстолита толщиной 2 мм, имеющего диэлектрическую проницаемость, равную шести. Они размещались над отражающим экраном на высоте 6 мм. Всего ректенна содержала 144 элемента.

Режим работы ректенны контролировался путем измерения плотности потока падающего СВЧ-пучка P в центре и на краях ее апертуры. Мощность постоянного тока ректенны P_0 вычислялась по результатам измерения напряжения на известной нагрузке R_n .

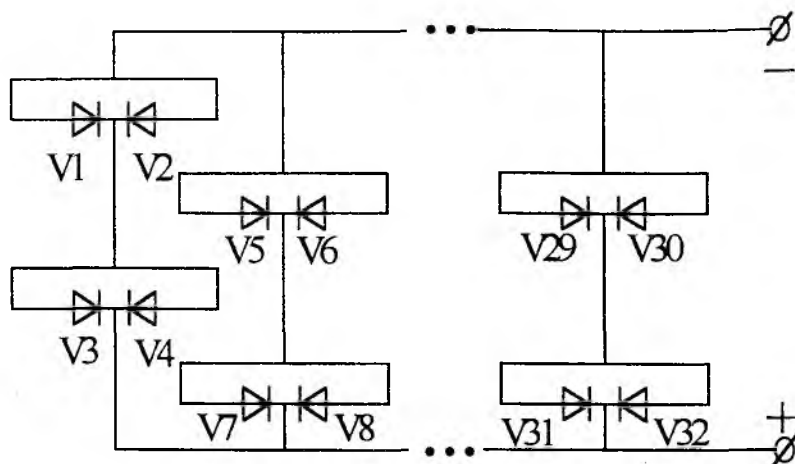


Рис. 3

Определялась зависимость мощности постоянного тока от сопротивления нагрузки при различных значениях плотности потока мощности падающего СВЧ-пучка для трех вариантов: 1) облучаемых однородным полем линейки из двух ПВЭ и центрального модуля, находящихся в составе ректенной решетки; 2) ректенны с последовательно соединенными модулями, возбуждаемой неравномерным полем, плотность потока мощности которого спадала к краям апертуры по экспоненте на 8 дБ; 3) линейки в составе уединенного модуля и уединенного модуля в целом.

Для первых двух вариантов результаты эксперимента отмечены на рис. 4 — 6 кружками, а для последнего — крестиками. Здесь же изображены теоретические кривые (сплошные линии), рассчитанные по описанному выше методу. Экспериментальные и теоретические зависимости хорошо совпадают друг с другом, как для однородно возбуждаемых линейки и модуля, так и для неоднородно возбуждаемой ректенны.

Интересно отметить, что параметры линейки ПВЭ в составе уединенного модуля и уединенного модуля в целом мало отличаются от параметров, измеренных для линейки и модуля, находящихся в составе ректенны. Полученный результат позволяет предположить, что можно существенно упростить этап подстройки ректенны на максимум КПД, определив, например, оптимальные размеры до экрана по результатам испытаний одного уединенного модуля.

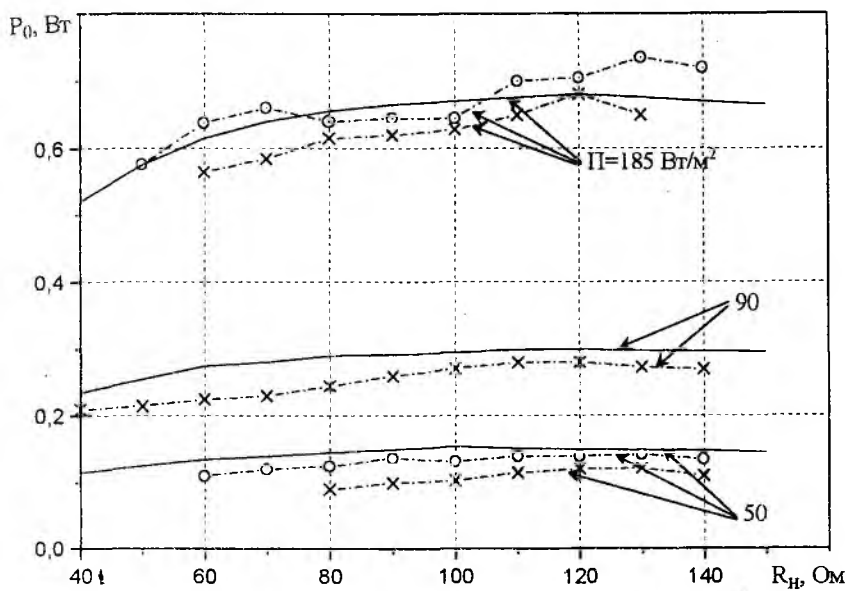


Рис. 4

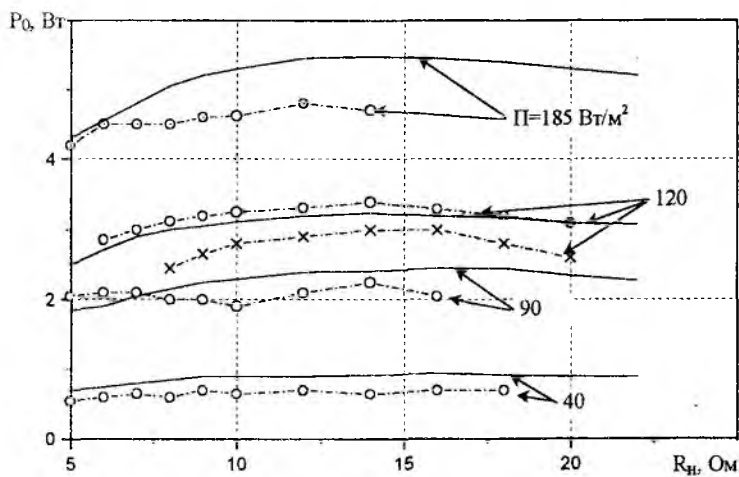


Рис. 5

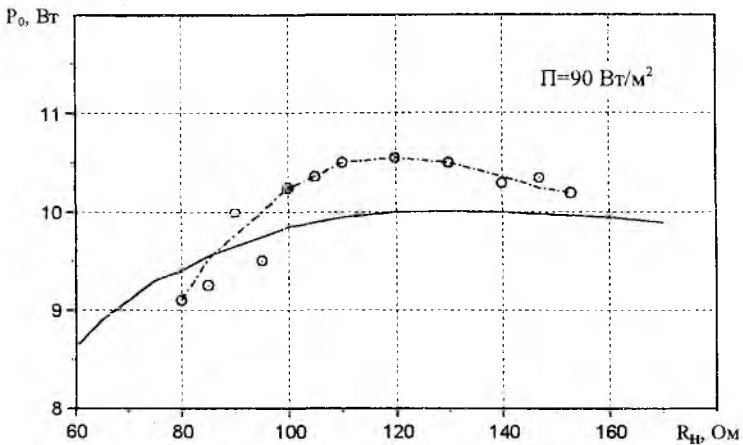


Рис. 6

Таким образом, основные результаты проведенных исследований состоят в следующем:

1. С использованием приближения бесконечной решетки разработан метод анализа параметров крупноапертурных ректенн, возбуждаемых равноамплитудно. На основе этого метода выполнены теоретические исследования ректенн при условии неравномерного облучения падающим полем.

2. Экспериментально подтверждено, что созданная теоретическая модель с высокой степенью адекватности описывает физические процессы в крупноапертурных ректеннах и может быть использована для расчетов на практике.

Список литературы: 1. Shifrin Y.S., Luchaninov A.I., Shcherbina A.A. Nonlinear antenna effects // Radioelectronics and Communication Systems. 1989. N 3. P. 2—8. 2. 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. 3. Шифрин Я.С., Лучанинов А.И., Посохов А.С. Нелинейные эффекты в активных фазированных решетках // Радиотехника и электрон. 1994. Т. 39, № 7. С. 1095—1106.

Харьковский государственный технический
университет радиозлектроники

Поступила в редколлегию 25.09.98