

*В.М. ШОКАЛО, д-р техн. наук, А.А. КОНОВАЛЬЦЕВ,
канд. техн. наук, Ю.А. ЛУЧАНИНОВ*

СНИЖЕНИЕ НАПРАВЛЕННОСТИ ПОБОЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ РЕКТЕННЫХ РЕШЕТОК

Одним из многообещающих альтернативных направлений развития современной энергетики можно считать построение систем беспроводной передачи энергии с помощью сфокусированного СВЧ-пучка. Конечным устройством таких систем служит ректенна (антенна-выпрямитель), назначение которой состоит в приеме энергии СВЧ и преобразовании ее в энергию постоянного тока. Ректенна представляет собой антенную решетку из большого числа приемно-выпрямительных элементов (ПВЭ), каждый из которых является излучателем, нагруженным на СВЧ-выпрямитель на диодах Шоттки. Как известно [1], процесс преобразования энергии СВЧ, выполняемый ректенной, существенно нелинеен и поэтому сопровождается излучением на частотах высших гармоник.

Вообще говоря, энергия, излучаемая ректенной на частотах высших гармоник, составляет лишь очень небольшую часть той энергии СВЧ-пучка, которая падает на ее апертуру. Однако, поскольку на этих частотах ректенна функционирует подобно фазированной антенной решетке, в определенных направлениях она способна создавать поле побочного излучения большой интенсивности, что порождает проблему электромагнитной совместимости ректенн.

Уменьшение направленности создаваемого ректенной побочного излучения может быть достигнуто за счет расфазировки ПВЭ на частотах гармоник любым известным способом: путем изменения случайным образом параметров элементов фильтров гармоник в ПВЭ, пространственной сдвижки модулей ректенны относительно друг друга и т.д. Общий недостаток перечисленных способов — дополнительное усложнение конструкции ректенны.

Исследуем возможность снижения направленности побочного излучения крупных ректенных решеток весьма простым способом. Его суть состоит в том, чтобы добиться на частотах высших гармоник противофазного возбуждения током соседних модулей ректенны или соседних линеек ПВЭ в пределах одного модуля. Техническая реализация указанного способа не влечет за собой усложнения конструкции модулей ректенны. Например, противофазное возбуждение излучателей ПВЭ в соседних линейках модуля ректенны на частотах высших гармоник (рис. 1, б) достигается за счет изменения направления включения диодов в схемах выпрямления ПВЭ на противоположное относительно направления при синфазном возбуждении (рис. 1, а).

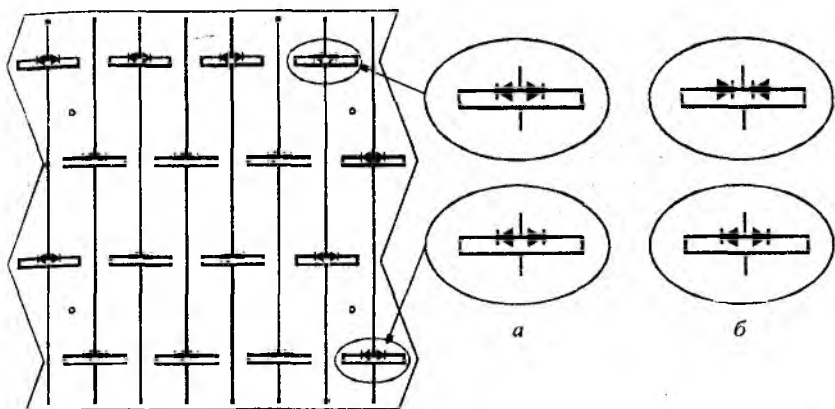


Рис. 1

Первоначально эффект снижения направленности побочного излучения ректенны, получаемый при реализации указанного выше способа, исследовался путем численного эксперимента. Для выполнения расчетов в качестве исходной модели была выбрана плоская периодическая ректенная решетка произвольной формы с косоугольной сеткой.

Для определения поля побочного излучения необходимо знать распределение сил токов на поверхности излучателей ПВЭ на частотах высших гармоник. При строгом расчете этого распределения требуется решить краевую задачу электродинамики с учетом нелинейных характеристик выпрямительных диодов. Однако, поскольку ректенна является крупноапертурной, т.е. имеет большие электрические размеры, решение такой строгой краевой задачи вряд ли осуществимо в обозримом будущем. В связи с этим при разработке метода расчета побочного излучения ректенны были сделаны такие упрощающие предположения: влияние краевых эффектов в ректенне отсутствует; все ПВЭ имеют такие же параметры, какие они имели бы в бесконечной решетке.

Использование указанных приближений позволяет применить к исследуемой ректенне методику расчета ее энергетических параметров, изложенную в [2].

На первом этапе методом моментов выполняется расчет электродинамических характеристик излучателей ПВЭ, который проводится как на основной частоте, так и на частотах высших гармоник. При этом распределение сил токов на частотах высших гармоник на поверхности излучателей ПВЭ аппроксимируется системой кусочно-синусоидальных базисных функций следующего вида:

$$\bar{I}(\xi) = \sum_{n=1}^M \bar{I}_n(\xi). \quad (1)$$

Здесь M — число базисных функций, которыми аппроксимируется распределение тока на поверхности излучателя ПВЭ; $\bar{I}_n(\xi)$ — базисная кусочно-синусоидальная функция, определенная на двух соседних отрезках излучателя следующим образом:

$$\bar{I}_n(\xi) = I_n \frac{\sin(kl_{mn} - \xi)}{\sin kl_{mn}} \bar{\xi}_{mn}, \quad m = 1, 2, \quad (2)$$

где I_n — амплитудный коэффициент n -й базисной функции; l_{1n}, l_{2n} — длины первого и второго отрезков проводника излучателя, на которых определена n -я базисная функция; ξ — координата вдоль первого или второго отрезков, отсчитываемая от точки их соединения; $\bar{\xi}_{1n}, \bar{\xi}_{2n}$ — единичные векторы, характеризующие направление соответствующих отрезков; $k = 2\pi/\lambda_i$ — волновое число для i -й гармоники.

Второй этап методики расчета энергетических параметров ректенны включает в себя разработанную в теории антенн с нелинейными элементами [3] процедуру расчета сил токов, которые протекают через выпрямительные диоды на основной частоте и на частотах высших гармоник, образующихся в процессе выпрямления. В результате этого становится известным амплитудно-фазовое распределение сил токов высших гармоник по апертуре ректенны, которое, в свою очередь, определяет значения амплитудных коэффициентов I_n базисных функций силы тока в выражении (2).

Таким образом, на основе методики [2] поле побочного излучения ректенны в дальней зоне может быть найдено в такой последовательности. Вначале определяется поле, создаваемое n -й базисной функцией силы тока. Затем по известным из решения задачи возбуждения ректенны коэффициентам I_n находится поле, создаваемое одним ПВЭ. Сумма полей всех ПВЭ дает полное поле ректенны на выбранной частоте побочного излучения.

В общем виде поле, создаваемое силой тока (2), может быть описано таким образом:

$$E_0(r, \theta, \varphi) = -\frac{j30I}{\sin(kl)} e^{jk\bar{r}_0\bar{r}} \frac{e^{jkl(\bar{\xi}\bar{r})} - j(\bar{\xi}\bar{r}) \sin kl - \cos kl}{1 - (\bar{\xi}\bar{r})^2} \times \quad (3)$$

$$\times (\cos \gamma_1 \cos \theta \cos \varphi + \cos \gamma_2 \cos \theta \cos \varphi - \cos \gamma_3 \sin \theta) \frac{e^{-jkr}}{r};$$

$$E_{\varphi}(r, \theta, \varphi) = \frac{j30I}{\sin(kl)} e^{jk\bar{r}_0\bar{r}} \frac{e^{jk l(\bar{\xi}\bar{r})} - j(\bar{\xi}\bar{r}) \sin kl - \cos kl}{1 - (\bar{\xi}\bar{r})^2} \times \quad (4)$$

$$\times (\cos \gamma_1 \sin \varphi - \cos \gamma_2 \cos \varphi) \frac{e^{-jkr}}{r}.$$

В выражениях (3) и (4) $\bar{r}_0$ — радиус-вектор, проведенный из начала координат в точку соединения двух отрезков, на которых определена базисная функция силы тока; $\bar{r}$ — единичный вектор в направлении точки наблюдения; r — расстояние до точки наблюдения; $\cos \gamma_1$, $\cos \gamma_2$, $\cos \gamma_3$ — направляющие косинусы единичного вектора $\bar{\xi}$.

Наличие экрана учитывалось введением зеркального изображения функции силы тока, поле которой определяется с учетом различия в фазе и положении силы тока зеркального изображения:

Окончательно поле полной базисной функции силы тока с номером n определяется следующим образом:

$$\begin{cases} E_{\theta n} = E_{\theta n1} - E_{\theta n2} - E'_{\theta n1} + E'_{\theta n2}; \\ E_{\varphi n} = E_{\varphi n1} - E_{\varphi n2} - E'_{\varphi n1} + E'_{\varphi n2}. \end{cases} \quad (5)$$

Здесь штрихом помечены поля зеркального изображения первого и второго отрезков.

Далее, применив принцип суперпозиции полей, нетрудно найти поле, создаваемое i -м ПВЭ ректенны:

$$E_{\theta, \varphi}^{(i)} = \sum_{n=1}^M E_{\theta, \varphi n}, \quad (6)$$

а затем и суммарное поле побочного излучения ректенны:

$$E_{\theta, \varphi}^{\Sigma} = \sum_{i=1}^N E_{\theta, \varphi}^{(i)}, \quad (7)$$

где N — число ПВЭ в ректенне.

Описанная выше процедура расчета была применена для численного исследования диаграмм направленности (ДН) побочного излучения ректенной решетки, состоящей из девяти однотипных модулей (один из них изображен на рис. 1) и содержащей 144 ПВЭ на петлевых вибраторах. При расчете принималось, что апертура ректенны облучается синфазным полем с равномерным амплитудным распределением.

Сопоставим расчетные ДН на частотах второй (рис. 2, а) и третьей (рис. 2, б) гармоник. Кривая 1 соответствует «традиционному» случаю, когда излучатели ПВЭ ректенны на частотах высших гармоник возбуждаются синфазно. ДН ректенны для случая противофазного возбуждения модулей на частотах высших гармоник представлена кривой 2, а кривая 3 соответствует случаю противофазного возбуждения линеек в модулях ректенны. Из сравнения указанных ДН побочного излучения на частотах второй и третьей гармоник можно сделать такие выводы:

— для рассматриваемой 144-элементной ректенны противофазное возбуждение модулей на частотах второй и третьей гармоник позволяет уменьшить максимальный уровень побочного излучения всего на $-9,5$ дБ;

— более существенное снижение направленности ректенны на частотах высших гармоник наблюдается при противофазном возбуждении соседних линеек в каждом модуле (до $-40 \dots -43$ дБ).

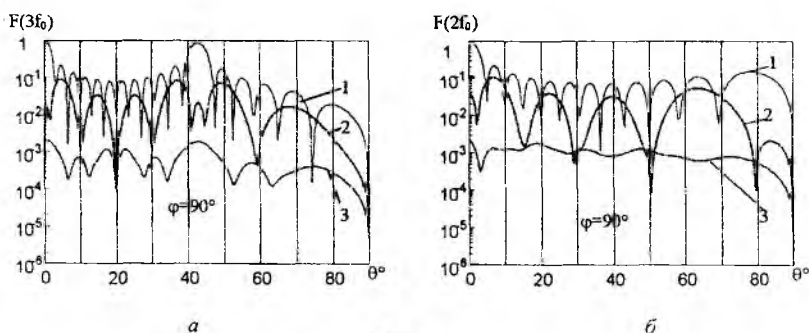


Рис. 2

Эффект снижения уровня побочного излучения при противофазном включении диодов в соседних линейках модуля ректенны (см. рис. 1, б) был подтвержден и экспериментально. С этой целью были выполнены измерения уровня гармоник модулей с противо- и синфазным включением диодов Шоттки. Структура измерительной установки показана на рис. 3.

Измерения проводились в безэховой камере 1. Исследуемый модуль ректенны 2 был нагружен по постоянному току на оптимальное сопротивление нагрузки $R_L = R_{L\text{opt}}$. Пучок СВЧ-энергии, падающий на модуль, формировался передающей зеркальной антенной 3 с радиусом раскрыва зеркала 0,45 м. Источником мощных СВЧ-колебаний с частотой 2,45 ГГц служил магнетронный генератор 4, питаемый блоком питания 5. Измерение амплитуд спектральных составляющих осуществлялось с помощью анализатора спектра 7, имеющего выносной пробник 6.

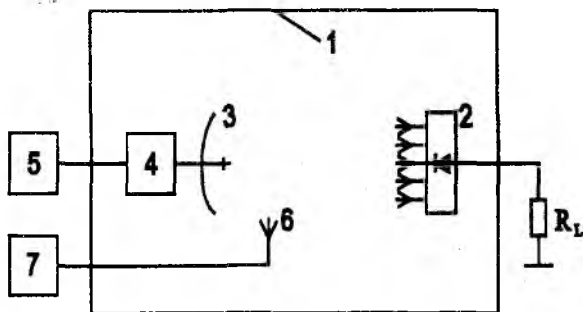


Рис. 3

Основная трудность в проведении измерений уровня гармоник, излучаемых модулем ректенны, состояла в том, что магнетронный генератор 4 имеет довольно значительный уровень собственных высших гармоник. В связи с этим измерялся лишь относительный уровень гармоник модуля по отношению к уровню гармоник генератора. Результаты выполненных измерений (таблица) свидетельствуют о том, что использование принципа

№ гармоник	Уровень гармоник, дБ			
	Генератор	Модуль с включением диодов		Выигрыш
		синфазным	противофазным	
1	0	0	0	—
2	-32,5	-26,3	-31,0	-4,7
3	-52,3	-43,4	-52,3	>-8,9

противофазного возбуждения диодов Шоттки лишь в одном модуле ректенны из 16 ПВЭ уже позволяет реализовать ощутимый выигрыш в подавлении второй и третьей гармоник (соответственно -4,7 дБ и более чем -8,9 дБ).

Таким образом, предложен и проверен весьма простой способ расфазировки побочного излучения ректенны путем создания условий, при которых соседние модули ректенны или соседние линейки ПВЭ в пределах одного модуля возбуждаются на частотах высших гармоник противофазно. Эффективность снижения уровня поля ректенны на частотах высших гармоник доказана результатами численных и экспериментальных исследований.

Список литературы: 1. *Spurious radiation of rectenna receiving-rectifying elements* / Y.S. Shifrin, A.I. Luchaninov, V.M. Shokalo, A.A. Shcherbina // Intern. Wroclaw Symp. on Electromagnetic Compatibility (EMC-94). Wroclaw, 1994. P. 67 — 72. 2. *Rectennas* / Y. Shifrin, A. Luchaninov, V. Shokalo, A. Shcherbina // JINA (Journées Intern. de Nice sur les Antennes), Nice, France, Nov., 1994. Nice, 1994. P. 394 — 397. 3. *Лучанинов А.И., Шифрин Я.С. Антенны с нелинейными элементами* // Справочник по антенной технике: В 5 т. / Под ред. Л.Д. Бахраха, Е.Г. Зелкина. М., 1997. Т. 1, гл. IX. С. 207 — 235.