

УДК 537.876

## НАПРАВЛЕННОСТЬ МНОГОДИПОЛЬНЫХ АНТЕНН В СИСТЕМАХ МИКРОВОЛНОВОЙ ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ

Ян Чунь, В. Л. Саввин

(кафедра радиофизики)

E-mail: savvin@phys.msu.ru

**Проведен расчет приемных характеристик многодипольных антенн в составе ректенных преобразователей в системах микроволновой передачи энергии. Изучено влияние числа, взаимного расположения и возможных отказов дипольных элементов на диаграмму направленности антенны.**

### Введение

Развитие работ в области СВЧ-энергетики создало основу для реализации высокоэффективных систем беспроводной передачи энергии для наземных и космических применений [1].

В качестве передающих систем беспроводных (микроволновых) линий передачи энергии часто рассматриваются антенные решетки, образованные системой дипольных излучателей. В приемных системах в качестве приемно-преобразующего элемента рассматривается ректенна, содержащая дипольную антенну и полупроводниковый диод с барьером Шоттки. Максимальная эффективность преобразования микроволн ректенной (до 90%) достигается в оптимальных режимах (1–2 Вт/диод), близких к предельным для современных СВЧ-диодов Шоттки. Подобный режим предполагается реализовать в крупномасштабных проектах космической энергетики [2], где проектная плотность мощности падающего излучения в центре приемной апертуры наземного комплекса достигает 230 Вт/м<sup>2</sup>. При оптимизированной плотности диполей (150 диполей/м<sup>2</sup> для частоты 2.45 ГГц) нагрузка на один ректенный элемент будет близка к оптимальной.

Однако вдоль радиуса наземного комплекса плотность мощности падающего излучения заметно уменьшается (до –10 дБ) и на краю апертуры составляет 23 Вт/м<sup>2</sup>. Это может вызвать существенное снижение эффективности преобразования при использовании однотипных ректенн на всей апертуре наземного комплекса. Эта же проблема возникает и в проектах наземной микроволновой передачи энергии, которые по соображениям экологической безопасности рассчитаны на еще более низкий уровень плотности мощности: 30 Вт/м<sup>2</sup> в центре и 3 Вт/м<sup>2</sup> на краю комплекса [3, 4]. Несоответствие уровня мощности микроволн, проходящейся на один диод, с оптимальным режимом его работы здесь проявляется еще резче.

Одним из решений этой проблемы может быть соединение нескольких диполей в антенный эле-

мент, нагруженный на один СВЧ-диод, при сохранении оптимальной плотности диполей. Применение подобных многодипольных (до 20 диполей) антенных элементов целесообразно и для наземных линий передачи с более низким уровнем плотности мощности микроволнового излучения.

Однако диаграмма направленности многодипольных антенных элементов может заметно отличаться от диаграммы направленности полуволновой дипольной антенны, используемой в обычных ректеннах. Это обстоятельство может существенно отразиться на общих энергетических характеристиках микроволновых линий передачи и требует дополнительного исследования. Кроме того, необходимо учитывать влияние ряда других факторов: числа диполей в антенном элементе, их конфигурации и взаимного расположения, отказа отдельных диполей в системах и т. п. Развитые в последние годы конечно-разностные методы моделирования электродинамических задач на базе прямого решения уравнений Максвелла дают возможность изучить эту проблему.

### 1. Метод расчета многодипольных антенн

Для анализа характеристик многодипольных антенных элементов использован метод, основанный на дискретизации интегральной формы уравнений Максвелла в пространственно-временном представлении [5, 6]:

$$\oint_{\partial A} \mathbf{E} ds = - \int_A \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} d\mathbf{A}, \quad (1)$$

$$\oint_{\partial A} \mathbf{H} ds = \int_A \left( \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \mathbf{J} \right) d\mathbf{A}, \quad (2)$$

$$\oint_{\partial V} \mathbf{D} d\mathbf{A} = \int_V \rho dV, \quad (3)$$

$$\oint_{\partial V} \mathbf{B} d\mathbf{A} = 0, \quad (4)$$

где  $\mathbf{E}(r, t) = \mathbf{E}(r)e^{j\omega t}$ ,  $\mathbf{H}(r, t) = \mathbf{H}(r)e^{j\omega t}$ ,  $\mathbf{D}(r, t) = \mathbf{D}(r)e^{j\omega t}$ ,  $\mathbf{B}(r, t) = \mathbf{B}(r)e^{j\omega t}$  — векторы напряженности и индукции электрического и магнитного полей,  $V$  и  $A$  — объем области и ее поверхность соответственно.

Для численного решения уравнений (1)–(4) область  $V$  разбивается на множество ячеек (сетку), ортогонально к этой первичной сетке создается вторичная сетка ячеек. При этом распределение компонент электрической напряженности  $\mathbf{e}$  и магнитной индукции  $\mathbf{b}$  локализованы на первичной сетке, а распределение компонент магнитной напряженности  $\mathbf{h}$  и электрической индукции  $\mathbf{d}$  — на вторичной сетке.

С учетом закона Фарадея интеграл по контуру в левой части уравнения (1) может быть записан с достаточной точностью как сумма четырех напряжений  $\mathbf{e}$  в узлах сетки, а производная магнитной индукции по времени, рассчитанная на первичной сетке, представляет собой подинтегральное выражение в правой части уравнения:

$$e_i + e_j - e_k - e_l = -\frac{\partial}{\partial t} b_n. \quad (5)$$

Повторяя эту процедуру для всех доступных ячеек первичной сетки, схема вычислений уравнения (1) может быть представлена в матричной формулировке:

$$C\mathbf{e} = -\frac{d}{dt}\mathbf{b}, \quad (6)$$

где  $C$  — дискретный матричный оператор, состоящий из элементов 0, 1 и  $-1$ .

Аналогично можно получить матричную формулировку уравнения (2) для вторичной сетки:

$$\tilde{C}\mathbf{h} = \frac{d}{dt}\mathbf{d} + \mathbf{j}, \quad (7)$$

где  $\tilde{C}$  — аналогичный дискретный матричный оператор.

Для дискретизации уравнений (3) и (4) удобно ввести дискретные операторы дивергенции  $\tilde{S}$  и  $\tilde{S}$ , относящиеся к первичной и вторичной сеткам соответственно:

$$\tilde{S}\mathbf{d} = \mathbf{q}, \quad (8)$$

$$\tilde{S}\mathbf{b} = \mathbf{0}. \quad (9)$$

Наконец, соотношения между напряженностью электрических и магнитных полей и значениями их электрической и магнитной индукции дают возможность приравнять их интегральные значения на гранях ячеек. Результирующие коэффициенты, зависящие от усредненных материальных параметров и от пространственного разрешения сетки, могут быть объединены в соответствующие матрицы  $M_\epsilon$ ,  $M_\mu$  и  $M_\sigma$ :

$$\mathbf{d} = M_\epsilon \mathbf{e}, \quad (10)$$

$$\mathbf{b} = M_\mu \mathbf{h}, \quad (11)$$

$$\mathbf{j} = M_\sigma \mathbf{e} + \mathbf{j}_s. \quad (12)$$

Таким образом, могут быть получены все матричные уравнения (6)–(12) для решения электромагнитных полевых задач на дискретном сеточном пространстве.

Начальные и граничные условия в рассматриваемой сеточной области задаются исходя из конкретной конструкции многодипольных антенн.

В процессе расчетов вычислялись значения направленности многодипольных антенн  $K(\theta) = 4\pi P_\theta P_0^{-1}$  и эффективности приема излучения  $\text{Eff} = (P_0 - P_p)P_0^{-1}$ , где  $P_0$  и  $P_\theta$  — полная мощность и мощность излучения из единичного угла,  $P_p$  — мощность потерь излучения в многодипольной антенне.

## 2. Результаты расчета

Исследовано два типа дипольных антенных решеток с различным числом элементов, предназначенных для работы в ректенных преобразователях на частоте 2.45 ГГц. Изучались свойства многодипольных антенн с «треугольным» расположением диполей (рис. 1, а) и с «прямоугольным» расположением диполей (рис. 1, б).

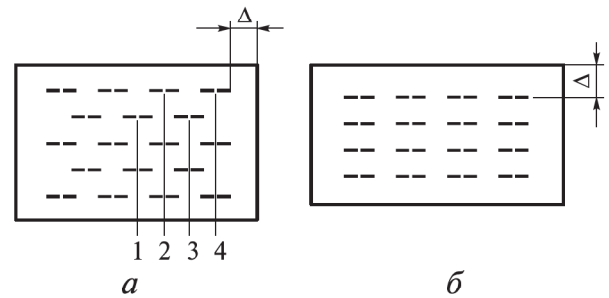


Рис. 1. Схемы расположения диполей в «треугольной» (а) и «прямоугольной» (б) многодипольной антенне.  $\Delta$  — размер выступающей части отражающей проводящей поверхности; 1, 2, 3, 4 — номера столбцов диполей в решетке

В «треугольных» антенных решетках, содержащих 5 и 18 элементов (рис. 1, а), диполи расположены в вершинах равностороннего треугольника на расстоянии  $0.64\lambda$ . В «прямоугольных» антенных решетках, содержащих 9 и 16 элементов (рис. 1, б), горизонтальное расстояние между диполями равнялось  $0.75\lambda$ . Вертикальное расстояние между рядами диполей выбиралось равным  $0.25\lambda$ . При этом предполагалось, что отдельные диполи в многодипольных антенных элементах соединены между собой микрополосковыми линиями так, что принятое ими излучение в случае его нормального падения на элемент суммируется синфазно\*).

\*) Расчет параметров соединительных микрополосковых линий представляет собой вполне решаемую техническую проблему и не входит в задачи настоящей работы.

Под дипольной антенной решеткой на расстоянии  $0.25\lambda$  помещен металлический отражатель для улучшения эффективности работы ректенного преобразователя.

Исследовано влияние выступающей части  $\Delta$  отражающей проводящей поверхности за внешний контур дипольных антенн на уровень усиления многодипольной антенной решетки (рис. 2). Расчеты показали, что при размере выступающей части, превышающем значение  $2\lambda$ , значения фронтальной и тыльной направленности системы практически не изменяются при изменении размера выступающей части  $\Delta$  отражателя, уровень боковых лепестков диаграммы направленности при этом изменяется также незначительно. Поэтому целесообразно ограничить размер выступающей части и в дальнейших расчетах применялось условие  $\Delta = 2\lambda$ .

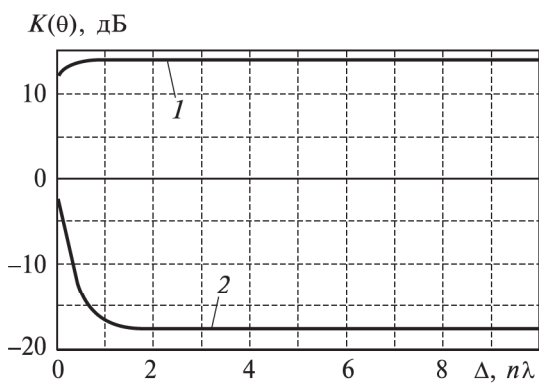


Рис. 2. Зависимость фронтальной (кривая 1) и тыльной (кривая 2) направленности пятиэлементной дипольной решетки с «треугольным» расположением диполей (см. вариант *a* на рис. 1) от размера выступающей части  $\Delta$  отражающей проводящей поверхности

Для изучения влияния числа и взаимного расположения диполей рассчитывались диаграммы направленности указанных выше дипольных решеток в условиях нормального и наклонного падения микроволнового излучения на плоскость ректенны.

На рис. 3 и 4 показаны диаграммы направленности антенных решеток в плоскости  $\phi = 90^\circ$  и  $\phi = 0^\circ$  относительно диполей для нормального падения микроволнового излучения.

При увеличении числа диполей направленность многодипольной антенны преобразователя растет и достигает уровня 19 дБ для «треугольной» решетки с 18 диполями. Эффективность антенных решеток с «треугольным» расположением диполей заметно выше, чем эффективность решеток с «прямоугольным» расположением диполей.

Одновременно увеличение числа диполей приводит к заметному сужению ширины диаграммы направленности: до  $18^\circ$  в плоскости  $\phi = 90^\circ$  и до  $20^\circ$  в плоскости  $\phi = 0^\circ$  для «треугольной» решетки с 18 диполями. В случае одиночной дипольной

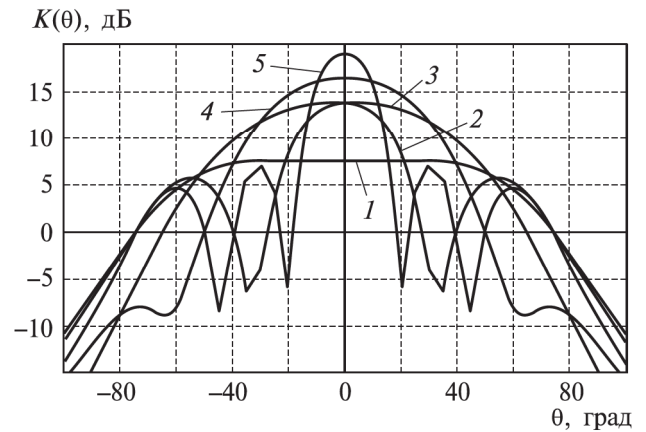


Рис. 3. Диаграмма направленности дипольных антенных решеток в плоскости  $\phi = 90^\circ$  для нормального падения микроволнового излучения. 1 — одиночный диполь, 2 — решетка из 5 диполей, 3 — решетка из 9 диполей, 4 — решетка из 16 диполей, 5 — решетка из 18 диполей

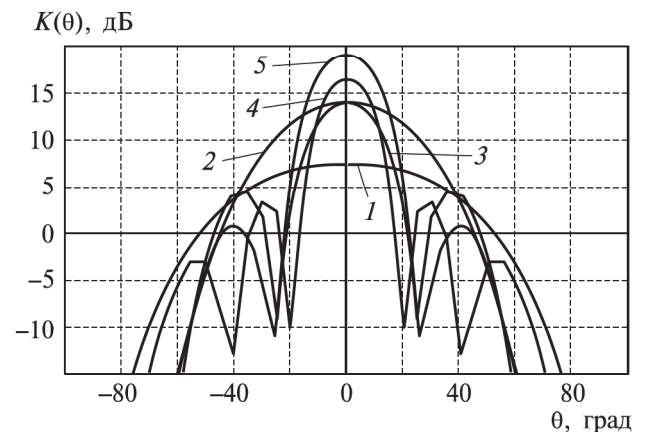


Рис. 4. Диаграмма направленности дипольных антенных решеток в плоскости  $\phi = 0^\circ$  для нормального падения микроволнового излучения. 1 — одиночный диполь, 2 — решетка из 5 диполей, 3 — решетка из 9 диполей, 4 — решетка из 16 диполей, 5 — решетка из 18 диполей

антенны ширина диаграммы направленности превышает  $120^\circ$  в плоскости  $\phi = 90^\circ$  и  $80^\circ$  в плоскости  $\phi = 0^\circ$ . Отметим, что диаграммы направленности в плоскости  $\phi = 90^\circ$  у решеток с «прямоугольным» расположением заметно шире диаграмм направленности «треугольных» решеток. Однако в плоскости  $\phi = 0^\circ$  их диаграммы весьма узки —  $14\text{--}20^\circ$  для рассчитанных вариантов. В случае решеток с «треугольным» расположением диполей все наоборот: в плоскости  $\phi = 0^\circ$  их диаграммы шире, чем в плоскости  $\phi = 90^\circ$ . С увеличением числа диполей эта разница нивелируется (табл. 1).

При наклонном падении микроволнового излучения на многодипольную антенную решетку ее диаграмма направленности становится несимметричной (рис. 5). Максимум диаграммы смещается

Таблица 1

Конфигурация	Многодипольный ректенный преобразователь			
	«треугольная»		«прямоугольная»	
Число диполей	5	18	9	16
Эффективность	0.98	0.97	0.86	0.84
Направленность, дБ	13.7	19.1	13.9	16.4
Ширина диаграммы в плоскости $\phi = 90^\circ$ в плоскости $\phi = 0^\circ$	22	18	62	46
	42	20	20	14

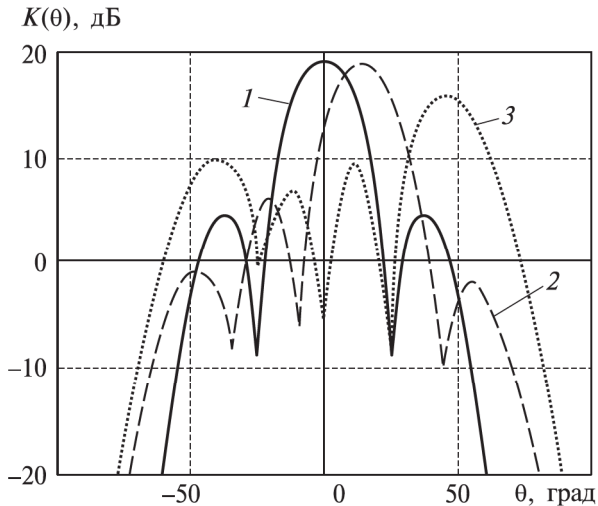


Рис. 5. Диаграмма направленности в плоскости  $\phi = 0^\circ$  для «треугольной» антенной решетки с 18 диполями при наклонном падении микроволнового излучения: 1 — нормальное падение, 2 — угол падения  $75^\circ$ , 3 — угол падения  $30^\circ$

навстречу падающему излучению, уровень основного максимума плавно уменьшается в отличие от изменений в уровне боковых лепестков. При угле падения  $30^\circ$  уровень задних лепестков достигает 10 дБ и оказывается лишь на 6 дБ ниже уровня основного максимума.

### 3. Влияние отказов диполей

Изучено влияние возможных отказов различных столбцов диполей в «треугольной» решетке с 18 элементами на форму и симметрию диаграммы направленности. Как показали результаты расчетов (табл. 2), отказ боковых столбцов № 2, 3, 4 (см. рис. 1) может вызвать лишь незначительное уменьшение направленности решетки (на 1–2 дБ)

и расширение основного лепестка (на 10–20%) в плоскостях  $\phi = 90^\circ$  и  $\phi = 0^\circ$ . При этом форма диаграммы направленности становится слегка несимметричной. Отказ центрального столбца диполей № 1 (см. рис. 1) не нарушает симметрии диаграммы направленности и лишь незначительно уменьшает ее величину.

Для решеток с меньшим числом диполей влияние подобных отказов становится более заметным.

### Выводы

Применение многодипольных антенн в ректенных элементах наиболее целесообразно для наземных линий микроволновой передачи энергии с экологически безопасным уровнем плотности мощности микроволнового излучения. Число диполей в отдельном ректенном элементе может варьироваться от пяти в центре приемного комплекса до двадцати на его краю. В этом случае режим работы выпрямляющего диода в ректенном элементе будет близок к оптимальному.

«Треугольное» расположение диполей является более эффективным и обладает большей направленностью по сравнению с «прямоугольной» конфигурацией. Возможные отказы отдельных столбцов диполей в рассмотренных вариантах многодипольных антенн могут вызвать незначительное уменьшение направленности решетки (на 1–2 дБ) и расширение основного лепестка (на 10–20%).

При разработке практических наземных систем микроволновой передачи энергии необходимо учитывать, что диаграмма направленности многодипольных антенн будет заметно отличаться от диаграммы направленности одиночного дипольного элемента. Уменьшение ширины диаграммы направленности в 4–5 раз потребует более тщательного

Таблица 2

### Влияние отказов в многодипольной антенне

Конфигурация	«треугольная», 18 диполей				
	нет	столбец 1	столбец 2	столбец 3	столбец 4
Направленность, дБ	19.1	18.1	17.9	18.2	17.8
Ширина диаграммы в плоскости $\phi = 90^\circ$ в плоскости $\phi = 0^\circ$	18	19.2	20.2	19.3	20.3
	20	21.6	22.5	21.7	22.4

позиционирования и юстировки передающих и приемных систем.

#### Литература

1. Диденко А.Н. СВЧ-энергетика: теория и практика. М., 2003.
2. Andryczuk R., Foldes P., Chestek J., Kaupang B. // IEEE Spectrum. 1979. **16**, N 7. P. 51.
3. Chang Kuang Sang L., Celeste A., Pignolet G., Lan Sun Luk J.D. // J. of Space Power. 2002. N 12. P. 53.
4. Celeste A., Jeanty P., Pignolet G. // Acta Astronautica. 2004. **54**, N 4. P. 253.
5. Weiland T. // Electronics and Communication (AEU). 1977. **31**. P. 116.
6. Weiland T. // Int. J. of Numerical Modelling. 1996. **9**. P. 295.

Поступила в редакцию  
28.08.06