

На правах рукописи

ЯН ЧУНЬ

**МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОЭЛЕМЕНТНЫХ РЕКТЕНН
ДЛЯ ПРИЕМА ЭНЕРГИИ В ДИАПАЗОНЕ МИКРОВОЛН**

Специальность 01.04.03 -радиофизика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2007

Работа выполнена на кафедре радиофизики физического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова.

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник
Саввин Владимир Леонидович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор
Слепков Александр Иванович

доктор технических наук, профессор
Чуян Ростислав Константинович

Ведущая организация: Московский инженерно-физический институт

Защита диссертации состоится " 22 " марта 2007 г. в 16 часов на заседании диссертационного совета Д.501.001.67 при Московском Государственном университете им. М.В. Ломоносова по адресу: 119992, г. Москва, Ленинские горы, МГУ, д.1, стр.2, физический факультет, Физическая аудитория им Р.В. Хохлова.

С диссертацией можно ознакомиться в читальном зале научной библиотеке им. А.М. Горького МГУ им. М.В. Ломоносова (физический факультет)

Автореферат разослан " " _____ 2007 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 501.001.67
кандидат физико-математических наук,
доцент

А.Ф. Королев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. Актуальность диссертационной работы связана с растущим интересом к возможности беспроводной передачи энергии с помощью направленного микроволнового излучения для наземных и космических применений. Микроволновый диапазон дает возможность существенно уменьшить размеры передающих и приемных антенн и отличается высоким уровнем эффективности устройств генерации и преобразования энергии электромагнитного излучения. Ряд перспективных проектов микроволновой передачи энергии разрабатываются в США, Японии и ЕС.

Главное требование к микроволновой передаче энергии заключается в достижении высокого КПД при одновременном обеспечении безопасности, экологической чистоты и электромагнитной совместимости передачи энергии. Уровень фонового излучения и боковых лепестков передающих антенных систем должны соответствовать требованиям стандартов безопасности. Для эффективного управления уровнем фонового излучения в крупномасштабных проектах солнечной космической энергетики предполагалось использовать коррекцию и оптимизацию амплитудного и фазового распределений на передающей антенне. Разработка проектов микроволновой передачи с существенно меньшим уровнем мощности, рассчитанных на реализацию в ближайшей перспективе, вызывает необходимость детальных исследований их физических свойств, эффективности и экологической безопасности.

Целью работы

Целью диссертационной работы является исследование:

- направленности многодипольных приемных антенных решеток и влияние ряда факторов (числа диполей, их конфигурации и взаимного расположения, дефектов отдельных диполей в системах и т.п.);
- диаграмм направленности и эффективности многодипольных приемных антенн с пространственно развитыми антенными элементами в зависимости от их конфигурации и взаимного расположения;
- приемных антенн с микрополосковыми дисковыми антеннами и возможности уменьшения обратного переизлучения гармоник основной частоты.

Научная новизна

Впервые предложены многодипольные приемные антенны для систем микроволновой передачи энергии с неоднородным распределением плотности электромагнитного излучения в плоскости приема. Показано, что их приемные

характеристики (диаграмма направленности, эффективность приема излучения) заметно отличаются от характеристик ректенны с полуволновым диполем и зависят от числа диполей в ректенне, их взаимного расположения, диэлектрических свойств подложки, дефектов отдельных диполей и др.

Показано, что выбор оптимального расстояния между диполями, их конфигурации и способа подключения полупроводникового диода обеспечивает высокую эффективность предложенных конструкций ректенн с пространственно развитыми антенными элементами (до 96%).

Установлено, что использование в дисковой микрополосковой антенне щелей, направленных вдоль линий тока для основной моды TM_{11} , дает возможность в четыре раза уменьшить интенсивность возбуждения дисковой антенны на удвоенной частоте.

Научная и практическая значимость

Результаты диссертационной работы дают возможность прогнозировать приемные характеристики ректенных элементов для экологически безопасных систем микроволновой передачи энергии с неоднородным распределением плотности электромагнитного излучения в плоскости приема.

Применение многодипольных ректенн, содержащих несколько диполей, нагруженных на один полупроводниковый диод, даст возможность повысить эффективность обратного преобразования микроволн в электрический ток в результате увеличения высокочастотной мощности на диоде Шоттки. Однако это потребует более тщательного позиционирования и юстировки приемных систем на передающую антенну.

Применение ректенны с дисковой микрополосковой антенной уменьшает в 4-5 раз уровень переизлучения кратных гармоник рабочей частоты, возникающих на полупроводниковом диоде в процессе преобразования микроволн в постоянный ток. Использование щелей, направленных вдоль линий тока для основной моды TM_{11} , дает возможность дополнительно в четыре раза уменьшить интенсивность возбуждения дисковой антенны на удвоенной частоте.

Защищаемые положения

1. Для достижения высокой эффективности наземных микроволновых линий передачи энергии с мощностью 10-100 кВт и безопасным уровнем фонового излучения наиболее рационально использовать ректенны с многодипольными антеннами, обеспечивающие оптимальный уровень входной мощности на диоде Шоттки.

2. Диаграммы направленности многодипольных ректенн сужаются при увеличении числа дипольных элементов (до $15-20^\circ$ на частоте 2,45 ГГц) и значительно отличаются от диаграммы направленности ректенного элемента с

одиночным диполем. Применение многодипольных ректенн в наземных линиях передачи энергии потребует более тщательного позиционирования и юстировки приемных систем на передающую антенну.

3. Выбор оптимального расстояния между диполями, конфигурации диполей и расположения выхода антенного элемента обеспечивает высокую эффективность приема микроволн ректеннами с пространственно развитыми антенными элементами (до 96%).

4. Использование в дисковой микрополосковой антенне щелей, направленных вдоль линий тока для основной моды TM_{11} , дает возможность в четыре раза уменьшить интенсивность возбуждения антенны на удвоенной частоте.

Апробация работы и публикации

Основные результаты исследований, изложенные в диссертации, докладывались автором на IX Всероссийской школе-семинаре «Волновые явления в неоднородных средах» (24-29.05.2004), X Всероссийской школе-семинаре «Физика и применение микроволн» (23-28.05.2005), X Всероссийской школе-семинаре «Волновые явления в неоднородных средах» (22-27.05.2006), Научной сессии МИФИ-2005 (24-28.01.2005), Научной сессии МИФИ-2006 (23-27.01.2006), Научной сессии МИФИ-2007 (22-26.01.2007) и опубликованы в трудах этих конференций, а также в препринтах Физического факультета МГУ:

Ян Чунь, В.Л. Саввин, Направленность ректенных решеток с пространственно развитыми антенными элементами//Препринт Физического факультета МГУ, №11/2006, стр.1-29, 2006;

Ян Чунь, В.Л. Саввин, Моделирование дисковых микрополосковых ректенн//Препринт Физического факультета МГУ, №14/2006, стр.1-18, 2006.

Статья «Направленность многодипольных антенн в системах микроволновой передачи энергии» направлена в журнал «Вестник МГУ, серия физика, астрономия».

Материалы работы неоднократно докладывались и обсуждались на научных семинарах кафедры радиофизики МГУ им. М.В. Ломоносова.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа (129 страниц) состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы (82 ссылки), иллюстрирована 79 рисунками и содержит 14 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1 посвящена обзору научных публикаций по проблемам и перспективам микроволновой передачи энергии. В параграфе 1.1 изложена краткая история развития беспроводной передачи энергии. В параграфе 1.2 обсуждаются проблемы и перспективы солнечной космической энергетики, включая проекты солнечных космических электростанций. Обзор работ по экспериментальным микроволновым системам передачи энергии проведен параграфе 1.3. Вопросы безопасности микроволновой передачи энергии и плотности потока энергии направленного микроволнового излучения обсуждаются параграфе 1.4.

Глава 2 посвящена теоретической модели для расчета поля излучения на апертуре приемной антенны.

В параграфе 2.2 рассмотрена осе-симметричная модель микроволновой передачи с линейной поляризацией электрического поля. Знание распределения электрического поля на передающей антенне \hat{E}_A дает возможность определить распределение поля в приемной области \hat{E}_R :

$$\hat{E}_R(r) = \frac{-jk}{D} e^{-j(kD + \frac{kr^2}{2D})} \int_0^{R_1} \hat{E}_A(r') e^{-j\frac{kr'^2}{2D}} J_0\left(\frac{kr r'}{D}\right) r' dr' \quad (1)$$

где $\hat{E}_A = E_A e^{j\Psi_A}$, $\hat{E}_R = E_R e^{j\Psi_R}$, E_A и E_R - распределения амплитуды поля в плоскости передающей и приемной антенн; Ψ_A и Ψ_R - соответствующие распределения фазы поля, D - расстояние между антеннами, $J_0(z)$ - функция Бесселя нулевого порядка, r - радиус в цилиндрической системе координат, R_1 - радиус передающей антенны.

Для дискретного распределения амплитуды поля на передающей антенне в виде N концентрических колец распределение поля в приемной области имеет вид:

$$E_R(r) = E_{\max} \frac{kR_1^2}{2D} \sum_{n=1}^N \Delta\varepsilon_n x_n^2 \Lambda_1(2\tau x_n r / R_2) \quad (2)$$

где $E_{\max} = \max \{E_n\}$; $\Delta\varepsilon_n = \varepsilon_n - \varepsilon_{n+1}$; $\varepsilon_n = E_n / E_{\max}$ и $x_n = r_n / R_1$ - относительная амплитуда и радиус n -го кольца.

Полная мощность излучения, перехваченная приемной антенной, и мощность, излученной передающей антенной, могут быть определены суммированием по соответствующей апертуре:

$$P_R = p_A \pi R_1^2 \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^N \Delta\varepsilon_n x_n^2 I_{nm} \quad (3)$$

$$P_T = p_A \pi R_1^2 \sum_{n=1}^N \Delta\varepsilon_n x_n^2 \quad (4)$$

где $I_{nm} = x_n x_m \int_0^{2\tau} J_1(x_n z) J_2(x_m z) z^{-1} dz$, $p_A = Z_0^{-1} E_{\max}^2$ (максимальная плотность мощности на передающей антенне), $\Delta \varepsilon_n = \varepsilon_n - \varepsilon_{n+1}$; $\varepsilon_n = E_n / E_{\max}$ и $x_n = r_n / R_1$ - относительная амплитуда и радиус n-го кольца.

В параграфе 2.3 приведены результаты моделирования поля излучения для наземной линии передачи с мощностью 10 кВт. Плотность мощности падающего излучения заметно изменяется на апертуре приемной антенны (до 10 дБ). На рис. 1 представлены результаты моделирования плотности мощности микроволн в приемной плоскости в зависимости от радиуса. В центре приемной антенны плотность мощности микроволн максимальна и равна 3.0 мВт/см², к краю антенны ($r=17$ м) она уменьшается до 0,35 мВт/см². Плотность мощности микроволн в максимумах боковых лепестков не превышает 0.02 мВт/см², что существенно ниже стандарта на безопасное микроволновое излучения как стран Запада, так и стандарта КНР.

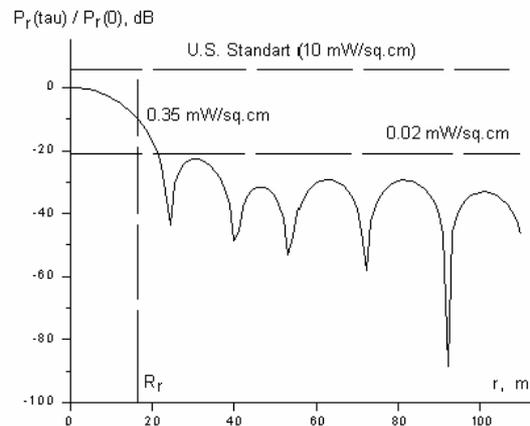


Рис. 1. Распределение плотности мощности микроволн в плоскости приемной антенны в зависимости от радиуса.

В параграфе 2.4 обсуждаются проблемы эффективности преобразования микроволнового излучения в электрический ток, вызванные неоднородностью

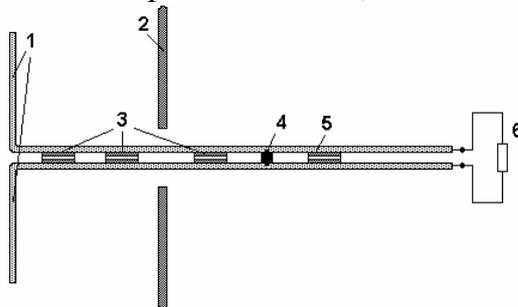


Рис. 2. Ректенный элемент с однополупериодным выпрямителем на диоде с барьером Шоттки, 1- полуволновой диполь, 2- отражающая поверхность, 3- встроенный фильтр нижних частот, 4- диод Шоттки, 5- выходной фильтр, 6- нагрузка в цепи постоянного тока.

распределения плотности мощности микроволн в приемной плоскости. Для приема и преобразования микроволн обычно используются ректенны,

содержащие полуволновый диполь в качестве приемной антенны и полупроводниковый диод Шоттки (см. рис. 2).

Для современных СВЧ диодов Шоттки максимальная эффективность преобразования микроволн (до 90%) достигается в оптимальных режимах по уровню входной мощности - 1-2 Вт/диод (см. рис. 3).

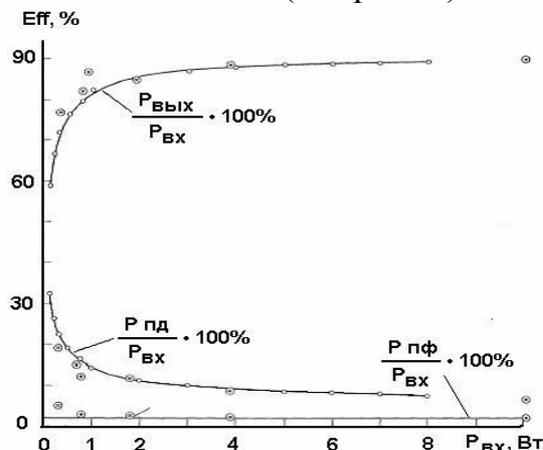


Рис. 3. Зависимость КПД ректенны ($P_{\text{вых}}/P_{\text{вх}}$), потерь на диоде ($P_{\text{пд}}/P_{\text{вх}}$) и потерь в фильтре от уровня входной мощности ($P_{\text{вх}}$) для экспериментального образца ректенны с диодом Шоттки

При низком уровне входной мощности эффективность диода Шоттки сильно уменьшается. Неоднородность мощности микроволнового излучения в приемной плоскости может вызвать существенное снижение эффективности преобразования при использовании однотипных ректенн на всей апертуре приемной антенны. Одним из решений этой проблемы может быть соединение нескольких диполей в антенный элемент, нагруженный на один СВЧ-диод, при сохранении оптимальной плотности диполей. Диаграмма направленности подобных элементов может заметно отличаться от диаграммы направленности одноэлементного ректенного преобразователя с полуволновой дипольной антенной. Это обстоятельство требует детального исследования, т.к. оно может существенно отразиться на общих энергетических характеристиках микроволновых линий передачи.

Глава 3 посвящена моделированию приемных ректенн с многодипольными антеннами и содержит результаты расчета их диаграмм направленности.

В параграфе **3.2** описана методика моделирования приемных ректенн с многодипольными антеннами. Для анализа характеристик многодипольных антенных элементов использован метод, основанный на дискретизации интегральной формы уравнений Максвелла. Для численного решения область решения разбивается на множество ячеек (сетку), ортогонально к этой первичной сетке создается вторичная сетка ячеек. Распределение компонент электрической напряженности e и магнитной индукции b локализованы на первичной сетке, а распределение компонент магнитной напряженности h и электрической индукции d на вторичной сетке. При этом интеграл по контуру может быть записан с достаточной точностью как сумма четырех напряжений e в узлах сетки, а производная магнитной индукции по времени рассчитывается

на первичной сетке. Повторяя эту процедуру для всех доступных ячеек первичной сетки, схема вычислений уравнений Максвелла может быть представлена в матричной формулировке:

$$C e = -\frac{d}{dt} b, \quad (5)$$

$$\tilde{C} h = \frac{d}{dt} d + j, \quad (6)$$

$$\tilde{S} d = q, \quad (7)$$

$$S b = 0. \quad (8)$$

$$d = M_\varepsilon e, \quad (9)$$

$$b = M_\mu h, \quad (10)$$

$$j = M_\sigma e + j_s, \quad (11)$$

где $C, \tilde{C}, S, \tilde{S}$ - дискретные матричные операторы, состоящие из элементов 0, 1 и -1. Начальные и граничные условия на сеточном пространстве задавались в зависимости от исследуемой конфигурации антенных элементов.

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

Параграф 3.3 содержит результаты исследований двух типов 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. 4а) и с «прямоугольным» расположением диполей (рис. 4б).

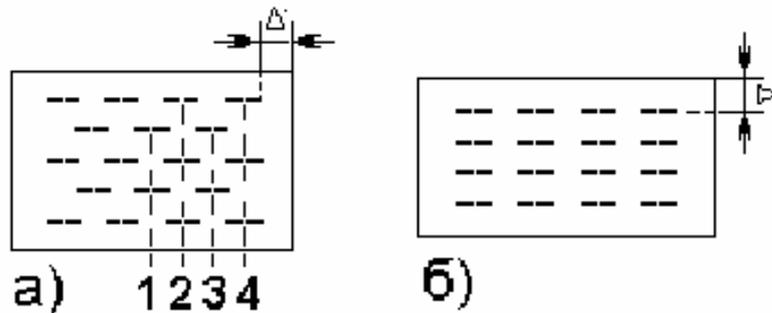


Рис. 4. Схемы расположения диполей в «треугольной» а) и «прямоугольной» - б) многодипольной антенне. Δ - размер выступающей части отражающей проводящей поверхности, 1,2,3,4 – номера столбцов диполей в решетке.

Исследовано влияние выступающей части Δ отражающей проводящей поверхности за внешний контур дипольных антенн на уровень усиления многодипольной антенной решетки. Расчеты показали, что при размере

выступающей части, превышающем значение 2λ , значения фронтальной и тыльной направленности системы практически не изменяются при изменении размера выступающей части Δ отражателя, уровень боковых лепестков диаграммы направленности при этом изменяется также незначительно. Поэтому целесообразно ограничить размер выступающей части и в дальнейших расчетах применялось условие $\Delta=2\lambda$.

На рисунках 5а – 5г показаны примеры моделирования дипольных антенных решеток и сеточное пространство, в котором решалась поставленная задача. Шаг сетки по осям X и Y выбрался автоматически, в зависимости от изменений граничных условий, и обеспечивал необходимую точность численных вычислений.

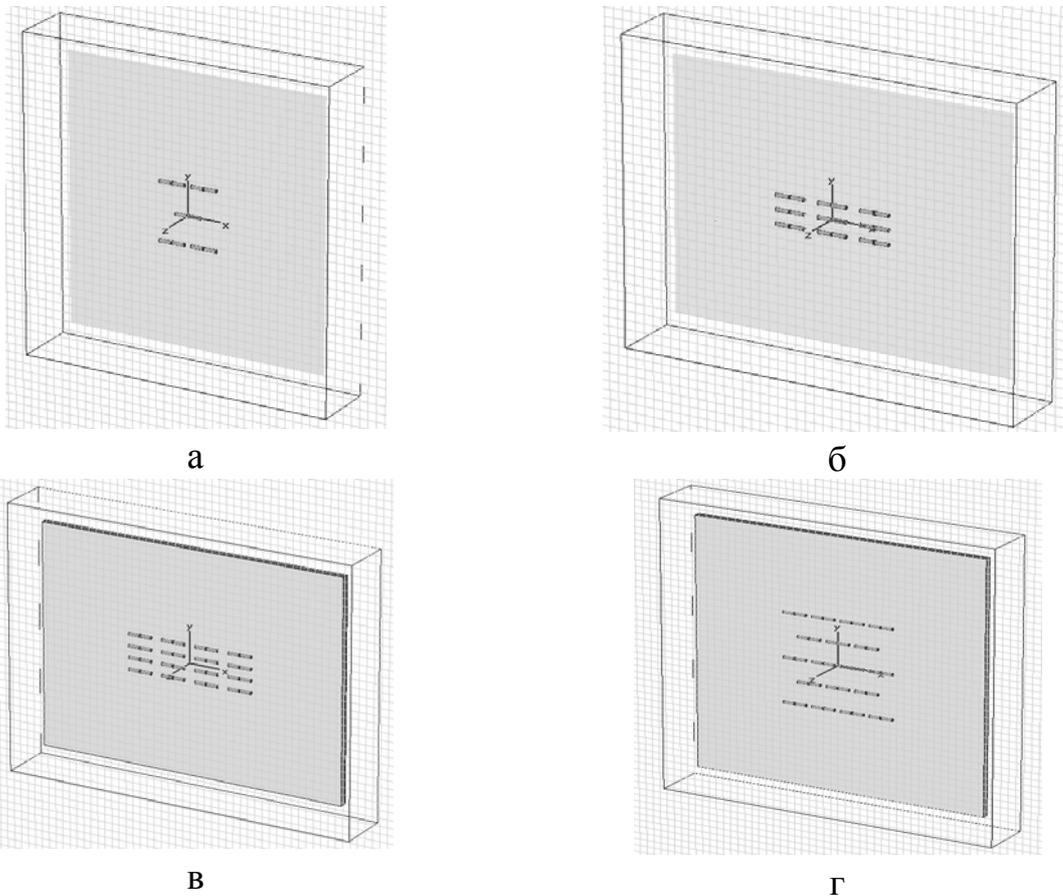


Рис. 5. Модели многоэлементных дипольных антенных решеток, а - 5 элементов (воздух), б - 9 элементов (воздух), в - 16 элементов (тефлон), г - 18 элементов (тефлон).

Пространство между плоскостью диполей и металлическим отражателем заполнено диэлектрической подложкой. В качестве диэлектрической подложки рассматривались воздух, арлон AD320, кварц, аморфный кремний, тефлон. На рис. 6 показаны их диаграммы направленности на частоте 2,45ГГц. При увеличении числа диполей диаграмма направленности сужается.

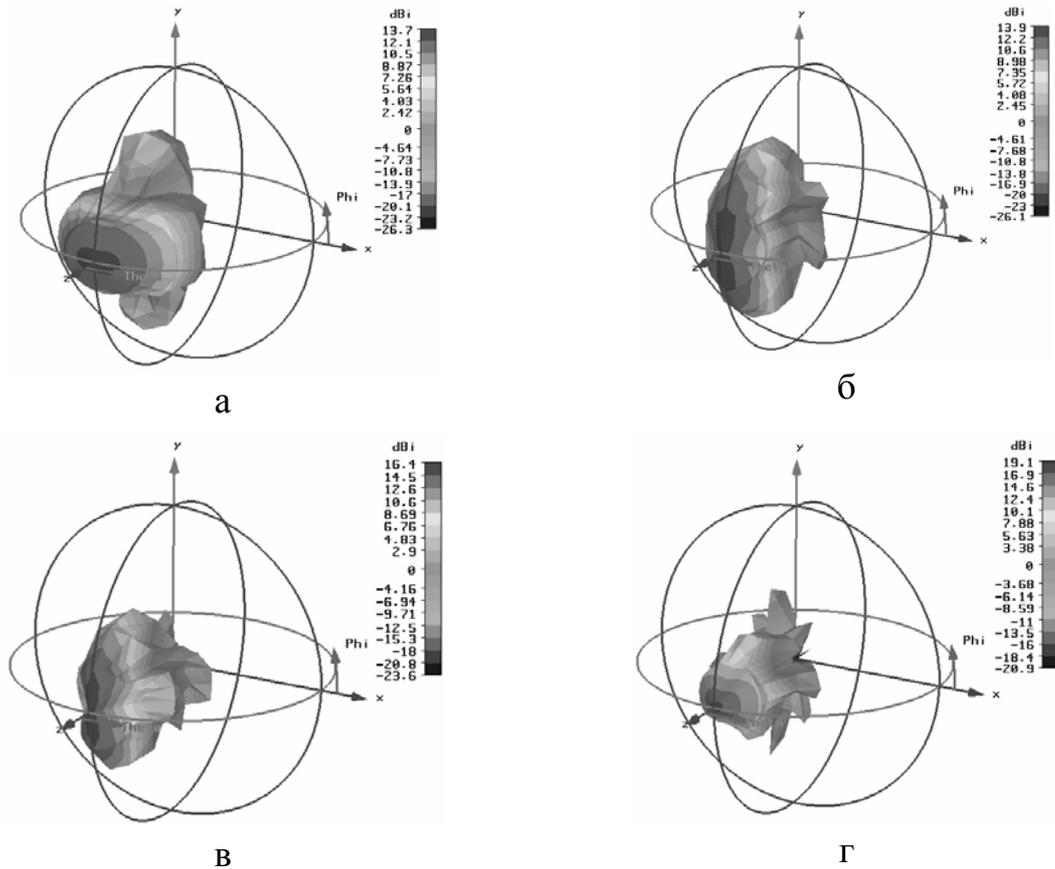


Рис. 6. Трехмерные диаграммы направленности многодипольных антенных решеток с воздушной подложкой, а - 5 элементов, б - 9 элементов, в - 16 элементов, г - 18 элементов.

На рис. 7 и рис. 8 показаны рассчитанные диаграммы направленности антенных решеток в плоскости $\varphi=90^0$ и $\varphi=0^0$ относительно диполей для нормального падения микроволнового излучения.

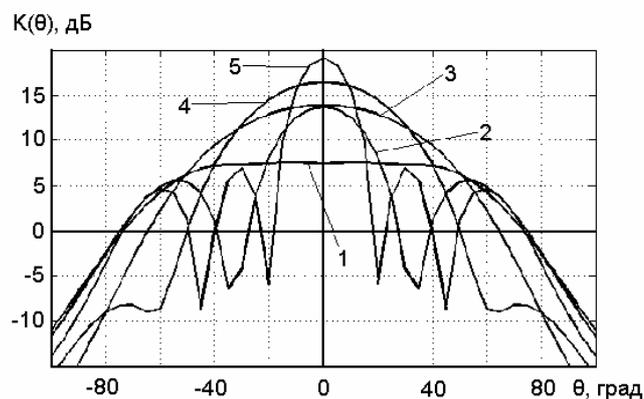


Рис. 7. Диаграмма направленности дипольных антенных решеток в плоскости $\varphi=90^0$ для нормального падения микроволнового излучения. 1- одиночный диполь, 2- решетка из 5 диполей, 3- решетка из 9 диполей, 4- решетка из 16 диполей, 5- решетка из 18 диполей.

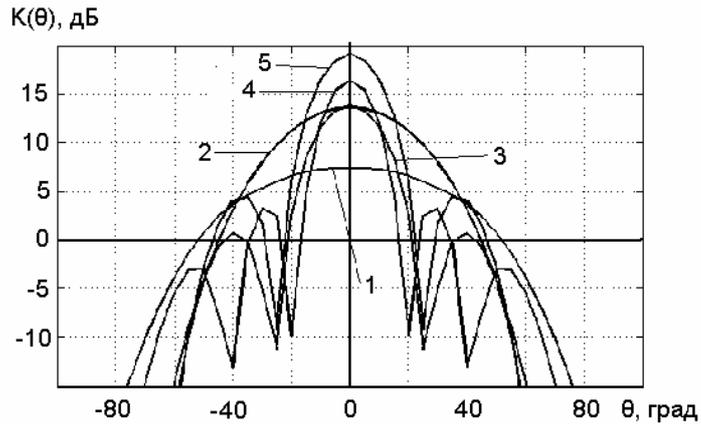


Рис. 8. Диаграмма направленности дипольных антенных решеток в плоскости $\varphi=0^0$ для нормального падения микроволнового излучения. 1- одиночный диполь, 2- решетка из 5 диполей, 3- решетка из 9 диполей, 4- решетка из 16 диполей, 5- решетка из 18 диполей.

При увеличении числа диполей в антенне направленность решеточной антенны увеличивается. Для выбранных расстояний между диполями «треугольное» расположение диполей является более эффективным и обладает большей направленностью по сравнению с «прямоугольной» конфигурацией. При увеличении расстояний между диполями в «прямоугольной» антенной решетке до величин, дающих плотность расстановки элементов, сравнимой с плотностью элементов для «треугольной» конфигурации, наблюдается сближение значений их направленности и эффективности.

При несинфазном суммировании принятого микроволнового излучения отдельными элементами многодипольной антенной решетки ее диаграмма направленности становится несимметричной (см. рис. 9). Рассмотрены случаи сдвига фазы принятого излучения с формированием волнового фронта, наклонного (в пределах $0-60^0$) к фронту падающего излучения.

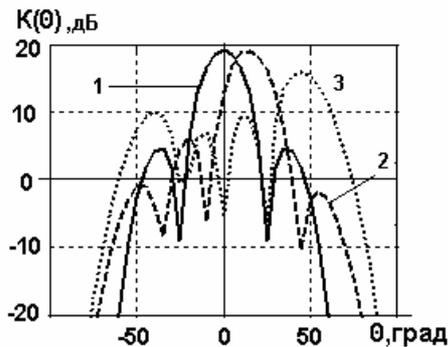


Рис. 9. Диаграмма направленности в плоскости $\varphi=0^0$ для «треугольной» антенной решетки с 18-ю диполями при несинфазном суммировании принятого микроволнового излучения. 1- синфазное суммирование, 2- угол наклона волнового фронта - 15^0 , 3- угол наклона волнового фронта - 60^0 .

В параграфе 3.4 приведены результаты расчетов влияния возможных дефектов различных столбцов диполей элементов в «треугольной» решетке с 18 элементами на форму и симметрию диаграммы направленности. Как показали результаты расчетов (см. табл. 1), дефект столбцов может вызвать лишь незначительное уменьшение направленности решетки (на 1-2 дБ).

Таблица 1. Влияние дефектов в многодипольной антенне.

Конфигурация	«треугольная», 18 диполей				
	нет	столбец 1	столбец 2	столбец 3	столбец 4
Дефекты диполей					
Направленность, дБ	19,1	18,1	17,9	18,2	17,8
Ширина диаграммы					
в плоскости $\varphi=90^0$	18	19,2	20,2	19,3	20,3
в плоскости $\varphi=0^0$	20	21,6	22,5	21,7	22,4

В параграфе 3.5 изучено влияние материала подложки на характеристики многодипольных антенн. В качестве модели выбрана 18-элементная дипольная решетка, описанная выше. В качестве исследуемых материалов были выбраны тефлон (PTFE), арлон (AR 320), плавленый кварц, аморфный кремний. Результаты показаны на таблице 2.

Таблица 2. Влияние диэлектрических свойств материала подложки на характеристики 18-элементной дипольной решетки.

Диэлектрик	Воздух	Тефлон PTFE	Арлон AR 320	Кварц Плавл.	Кремний аморфн.
ε	1,0	2,08	3,2	3,78	11,9
μ	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
$\text{tang } \delta$	0,00	0,0004	0,0003	0,0001	0,004
Направленность, дБ	19,1	18,7	18,6	18,3	15,0
$\Delta\varphi$ осн. максимум ($\varphi=90^0$)	18	18	18	18	20
КПД, %	0,98	0,98	0,97	0,97	0,71
$\Delta\varphi$ осн. максимум ($\varphi=0^0$)	20	20	20	20	22

Расчеты показали, что в случае применения материалов с значением ε в пределах 1- 4 и малыми потерями направленность 18-элементных дипольных решеток практически не отличаются друг от друга. Применение в качестве диэлектрической подложки кремния ($\varepsilon =11,9$, $\text{tang } \delta=0,004$) приводит к видимому ухудшению КПД и направленности решетки.

Глава 4 посвящена изучению направленности приемных ректенн с пространственно развитыми антенными элементами. Ректенна с пространственно развитым диполем (диполь Н-типа) была предложена для использования в микроволновой линии передачи, разрабатываемой во Франции,

с целью снижения плотности приемных элементов. В диссертационной работе рассматриваются три типа предложенных ректенн с пространственно развитыми диполями и проводится их сравнение с ректенной с диполем Н-типа.

Параграф 4.2 содержит описание моделирования приемных ректенн с пространственно развитыми антенными элементами, схемы которых показаны на рис. 10.

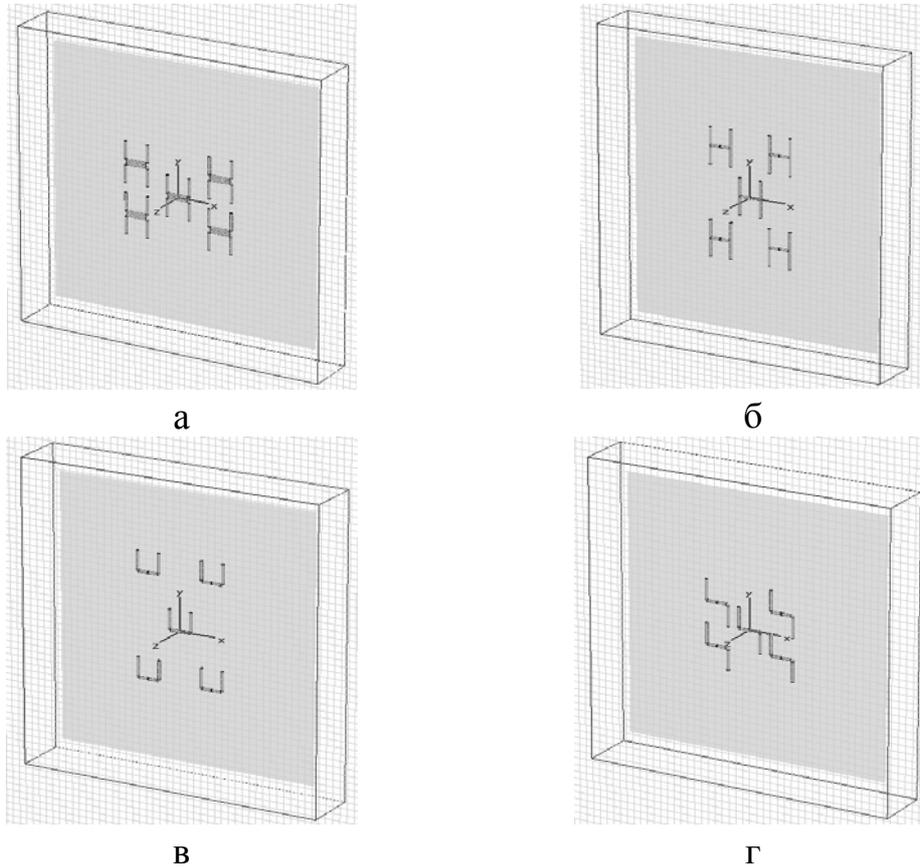


Рис. 10. Модели 5-элементных антенных решеток с пространственно развитыми диполями, а - Н тип, б - Н1 тип, в - Н2 тип, г - Н3 тип.

Параграф 4.3 содержит результаты расчета диаграмм направленности многодипольных ректенн с пространственно развитыми антенными элементами. На рис. 11 приведены трехмерные диаграммы направленности единичного диполя с пространственно развитыми антенными элементами, соответственно а – для Н типа, б – для Н1 типа, в – для Н2 типа и г – для Н3 типа.

В параграфе 4.4 проведен сравнительный анализ диаграмм направленности ректенн с различной конфигурацией антенных элементов. На рис. 12 показаны диаграммы направленности 5-элементных антенных решеток с «треугольным» расположением элементов, образованных диполями типа Н, Н1, Н2 и Н3 в плоскости $\varphi=90^0$. Наибольшим значением направленности среди рассмотренных 5-элементных антенных решеток обладает решетка, образованная диполями типа Н, однако ей же присуща самая узкая угловая область приема излучения – менее 15^0 по уровню -3 дБ в плоскости $\varphi=90^0$.

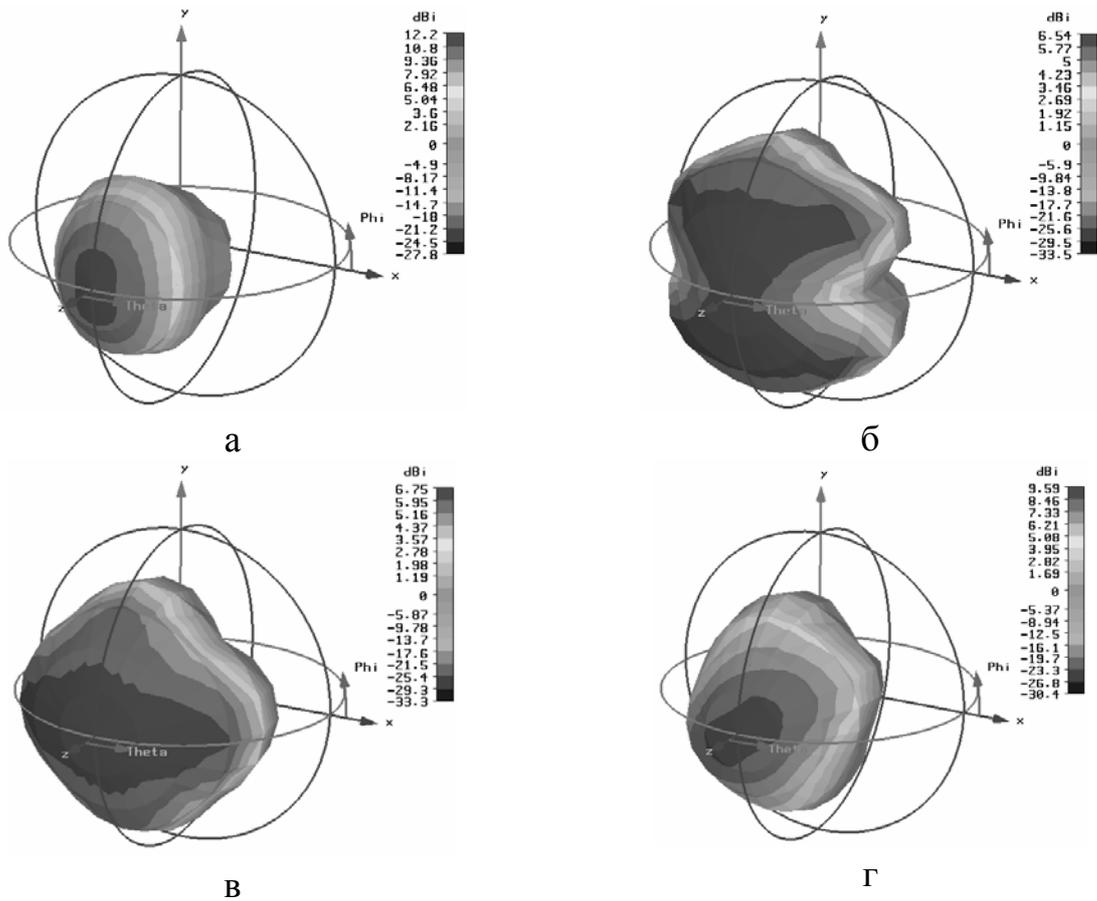


Рис. 11. Трехмерные диаграммы направленности ректенн с пространственно развитым диполем, а - Н тип, б - Н1 тип, в - Н2 тип, г - Н3 тип.

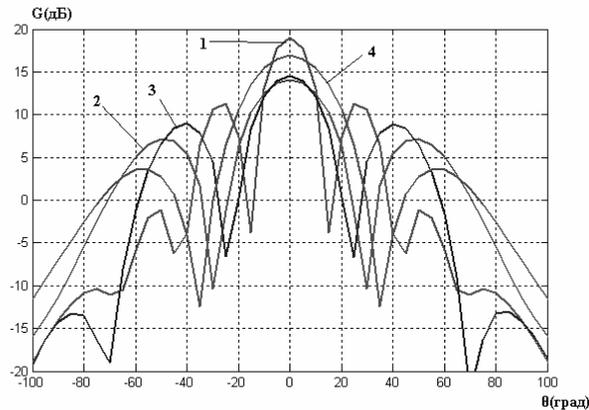


Рис. 12. Диаграммы направленности 5-элементных антенных решеток, образованных диполями типа Н, Н1, Н2 и Н3 (кривые 1, 2, 3 и 4 соответственно) в плоскости $\varphi=90^0$.

Решетки, образованные диполями типа Н1, Н2 и Н3, имеют угловую ширину приема в 2 раза больше. Одновременно они обладают меньшим уровнем боковых лепестков по сравнению с решеткой, образованной диполями типа Н. На рис. 13 показаны диаграммы направленности 18-элементных антенных решеток с «треугольным» расположением элементов, образованных

ДИПОЛЯМИ

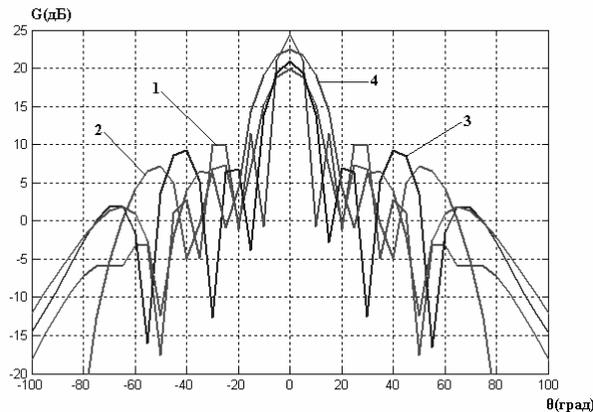


Рис. 13. Диаграммы направленности 18-элементных антенных решеток, образованных диполями типа Н, Н1, Н2 и Н3 (кривые 1, 2, 3 и 4 соответственно) в плоскости $\varphi=90^0$.

типа Н, Н1, Н2 и Н3 в плоскости $\varphi=90^0$. Диаграммы направленности 18-элементных антенных решеток обладают свойствами, характерными для решеток с «треугольным» расположением элементов. Уровень боковых лепестков существенно ниже, чем у решеток с «прямоугольным» расположением элементов. Наибольшим значением направленности среди рассмотренных 18-элементных решеток обладает решетка, образованная диполями типа Н, однако ей же присуща самая узкая угловая область приема излучения – менее 10^0 по уровню -3 дБ в плоскости $\varphi=90^0$. Решетки, образованные диполями типа Н1, Н2 и Н3, имеют угловую ширину приема в 2-3 раза больше.

Параграф 4.5 содержит результаты исследования влияние взаимного расположения антенных элементов на направленность ректенн. Сравнение диаграмм направленности рассмотренных решеток демонстрирует важность выбора расстояния d между диполями. При увеличении расстояния между диполями КПД решетки уменьшается одновременно с ухудшением направленности и сужением основного лепестка.

Глава 5 посвящена исследованию ректенн с дисковыми микрополосковыми антеннами.

В параграфе 5.2 обсуждаются резонансные свойства дисковых микрополосковых антенн. Дисковая микрополосковая антенна (ДМА) представляет собой двухслойную композицию круглой формы из тонкого металлического диска и диэлектрической подложки, нанесенную на плоскую металлическую поверхность (см. рис. 14). Резонансные частоты круглой ДМА можно определить из решений уравнения

$$J'_n(k_n a) = 0, \quad (12)$$

$$k = 2\pi f_o \sqrt{\varepsilon \varepsilon_o \mu_o}, \quad (13)$$

где $J'_n(k_n a)$ - производная функции Бесселя первого рода n -го порядка, a

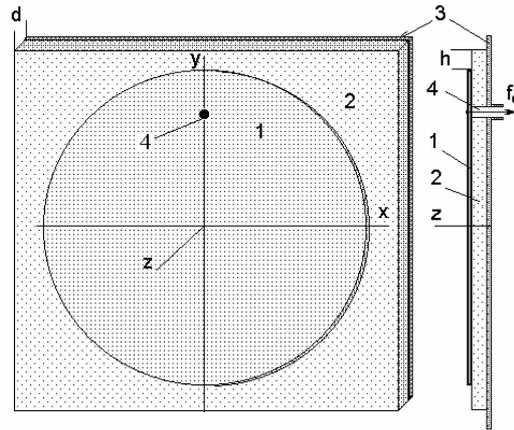


Рис. 14. Дисконная микрополосковая антенна, 1- металлический диск, 2- диэлектрическая подложка, 3- металлический отражатель, 4- коаксиальный вывод.

радиус круглого диска, f_o - рабочая частота, ε - относительная подложки, ε_o , μ_o - диэлектрическая и магнитная проницаемость вакуума.

Радиус диска выбирался из условия резонанса для основной моды TM_{11} на рабочей частоте f_o . Как следует из решения уравнений (12-13) резонансные частоты круглой ДМА для других мод не совпадают с частотами кратных гармоник рабочей частоты f_o , возникающих в процессе выпрямления на диоде (см. рис. 15). Поэтому интенсивность переизлучения на частотах кратных гармоник у ректенн с ДМА будет существенно ниже, чем у ректенн с полуволновым диполем.

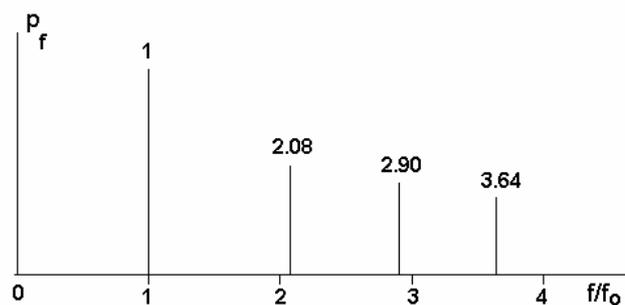


Рис. 15. Резонансные частоты круглой ДМА относительно частот кратных гармоник рабочей частоты f_o .

Параграф 5.3 содержит результаты моделирования приемной ректенны с дисконной микрополосковой антенной. Шаг сетки по осям X и Y выбрался автоматически, в зависимости от изменений граничных условий, и обеспечивал необходимую точность численных вычислений. Минимальное значение шага сетки равнялось 0,08мм. Максимальное общее число ячеек сетки превышало

1,5 млн. На рис. 16 приведены результаты расчета диаграммы направленности ДМА в дальней зоне для рабочей частоты $f_o = 2,45$ ГГц.

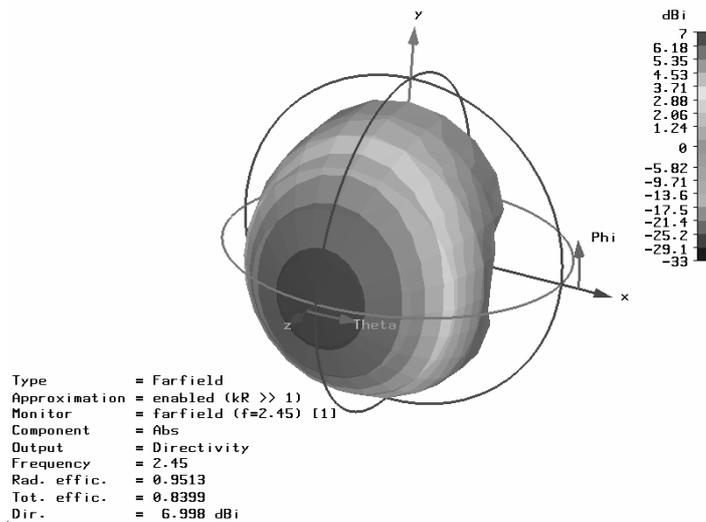


Рис. 16. Рассчитанная диаграмма направленности ДМА в дальней зоне.

Необходимо отметить симметричность и значительную угловую ширину (более 80° по уровню -3 дБ) диаграммы направленности ДМА. Максимальное расчетное значение направленности дисковой антенны составило $7,0$ дБ. Рассчитанное значение КПД антенны достигает 84% и ограничено потерями в диэлектрике. Распределение плотности тока по поверхности диска антенны для доминантной моды TM_{11} на частоте $2,45$ ГГц представлено на рис. 17.

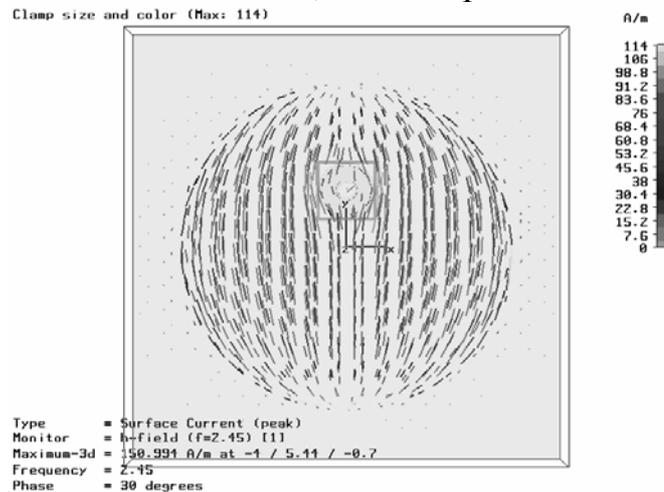


Рис. 17. Распределение плотности тока на поверхности ДМА ($f_o = 2,45$ ГГц).

Амплитудное значение плотности тока в центре антенны составляет около 88 А/м для выбранного уровня мощности на рабочей частоте. В области коаксиального вывода наблюдается искривление линий тока на поверхности диска.

Результаты расчета плотности тока по поверхности диска антенны для удвоенного значения рабочей частоты ($f_1 = 2 \times f_o = 4,9$ ГГц) представлены на рис. 18. На удвоенной частоте f_1 возбуждается, главным образом, мода TM_{01} .

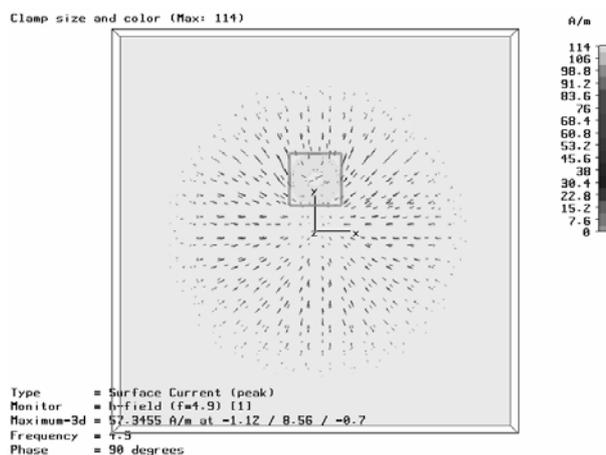


Рис. 18. Распределение плотности тока на поверхности ДМА ($f_1 = 4,9$ ГГц).

Линии тока направлены, в основном, по радиальным направлениям от центра антенны. Однако из-за разницы между частотой возбуждения и резонансного значения частоты для моды TM_{01} амплитуда плотности тока на поверхности диска не превышает уровня 22 А/м, т.е. в четыре раза ниже уровня для частоты $f_o = 2,45$ ГГц. Тем самым подтверждается предположение о подавлении переизлучения кратных гармоник рабочей частоты в дисковой микрополосковой антенне.

В параграфе 5.4 приведены результаты расчетов изменения амплитуды поля на удвоенной частоте при введении щелевых отверстий на поверхности диска. Модель дисковой микрополосковой антенной с щелевыми отверстиями и сеточное пространство приведены на рис. 19.

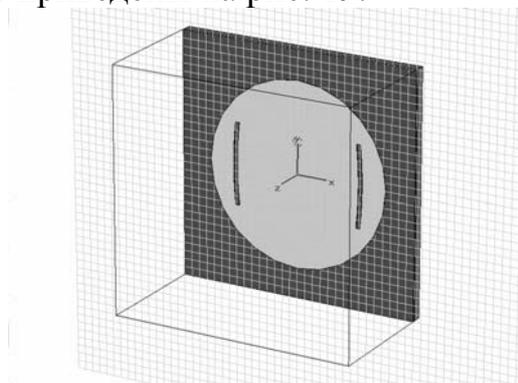


Рис. 19. Модель дисковой антенны со щелями.

Распределение линий тока на поверхности ДМА со щелями, возбуждаемых на частоте $f_o = 2,45$ ГГц, представлено на рис. 20. Введение дополнительных щелей в диск антенны не вносит значительных изменений в распределение тока на поверхности антенны на рабочей частоте. Амплитудное значение плотности тока практически не изменилось и осталось на уровне 88 А/м, несмотря на некоторое несоответствие выбранного радиуса кривизны щелей форме линий тока. Таким образом, введение щелей не скажется на интенсивности моды TM_{11} , возбуждаемой на рабочей частоте f_o .

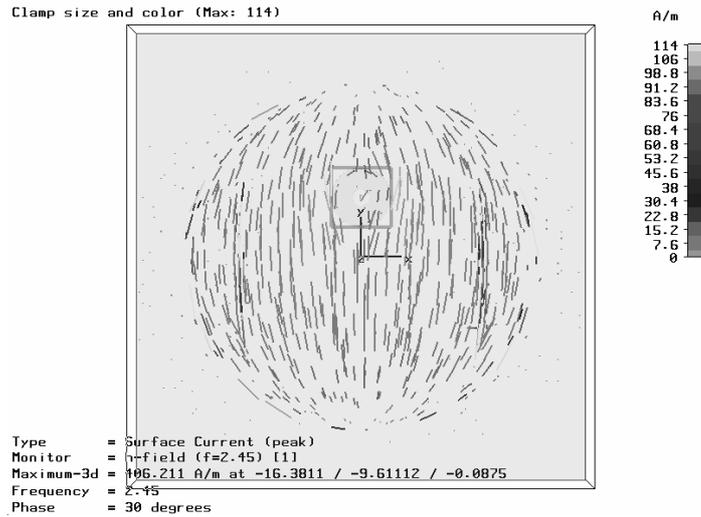


Рис. 20. Распределение плотности тока на поверхности ДМА со щелями на частоте $f_o = 2,45$ ГГц.

На рис. 21 показано распределение плотности тока на удвоенной частоте 4,9 ГГц. В области антенны, где щели пересекали радиальные линии тока для моды TM_{01} , плотность тока падает практически до нуля. Максимальный уровень плотности тока наблюдается в районе коаксиального вывода и не превышает уровня 5,6 А/м, т.е. практически в четыре раза ниже по сравнению с уровнем для антенны без щелей.

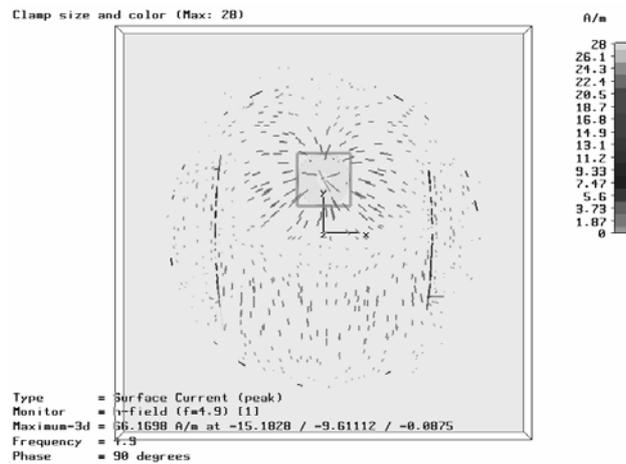


Рис. 21. Распределение линий тока на поверхности антенны ДМА со щелями на удвоенной частоте 4,9 ГГц.

Таким образом, проведенные моделирование показало, что введение в конструкцию антенны щелей, направленных вдоль линий тока для основной моды, дает возможность заметно (в четыре раза) уменьшить интенсивность возбуждения антенны на удвоенной частоте по сравнению с обычной ДМА.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Выбор оптимальных параметров наземной микроволновой линии передачи энергии (уровня передаваемой мощности, профиля поля на передающей антенне, параметра передачи τ и др.) дает возможность обеспечить эффективную (с КПД 80% и более) и экологически безопасную передачу энергии направленным микроволновым излучением.

2. Для достижения высокой эффективности наземных микроволновых линий передачи энергии с мощностью 10-100 кВт и экологически безопасным уровнем фонового излучения наиболее рационально использовать ректенны с многодипольными антеннами, обеспечивающие оптимальный уровень входной мощности на диоде Шоттки.

3. Диаграммы направленности многодипольных ректенн сужаются при увеличении числа дипольных элементов (до $15-20^\circ$ на частоте 2,45 ГГц) и значительно отличаются от диаграммы направленности ректенного элемента с одиночным диполем. Применение многодипольных ректенн в наземных линиях передачи энергии потребует более тщательного позиционирования и юстировки приемных систем на передающую антенну.

4. Выбор оптимального расстояния между элементами, конфигурации диполей и расположения выхода антенны обеспечивает высокую эффективность приема микроволн ректеннами с пространственно развитыми антенными элементами (до 96%).

5. Применение ректенн с дисковой микрополосковой антенной (ДМА) снижает уровень переизлучения кратных гармоник рабочей частоты, возникающих на полупроводниковом диоде в процессе выпрямления, в 4-5 раз из-за несовпадения их частот с резонансными частотами круглой ДМА.

6. Использование в дисковой антенне щелей, направленных вдоль линий тока для основной моды TM_{11} , дает возможность дополнительно в четыре раза уменьшить интенсивность возбуждения антенны на удвоенной частоте.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Казарян Г.М., Саввин В.Л., Ян Чунь, Экологические аспекты беспроводной передачи энергии СВЧ пучком// Сб. тр. конф. «Научная сессия МИФИ-2004», Т. 8, 2004, С. 25-26.

2. Казарян Г.М., Рудаков А.В., Саввин В.Л., Ян Чунь, Радиофизические и экологические аспекты наземной микроволновой линии передачи энергии//Тр. IX Всероссийской школы-семинара «Волновые явления в неоднородных средах», Секция 6, 2004, Звенигород Моск. обл., С.86-87.

3. Казарян Г.М., Рудаков А.В., Саввин В.Л., Ян Чунь, Экологическая безопасность наземной микроволновой линии передачи энергии// Сб. тр. конф. «Научная сессия МИФИ-2005», Т. 8, 2005, С. 8-9.

4. Ян Чунь, Саввин В.Л., Анализ широкополосных излучателей

микроволн//Тр. X Всероссийской школы-семинара «Физика и применение микроволн», Секция 2, 2005, Звенигород Моск. обл., С.16-18.

5. Елагин О.И., Казарян Г.М., Рудаков А.В., Саввин В.Л., Ян Чунь, Эффективность и экологическая безопасность микроволновой передачи энергии// Сб. тр. конф. «Научная сессия МИФИ-2006», Т. 8, 2006, С. 12-14.

6. Саввин В.Л., Ян Чунь, Расчет поля излучения фазированной антенной решетки в микроволновой передаче энергии// Сб. тр. конф. «Научная сессия МИФИ-2006», Т. 8, 2006, С. 14-15.

7. Саввин В.Л., Ян Чунь, Многодипольные антенны в системах микроволновой передачи энергии// Тр. X Всероссийской школы-семинара «Волновые явления в неоднородных средах», Секция 7, 2006, Звенигород Моск. обл., С.72-74.

8. Ян Чунь, Саввин В.Л., Направленность ректенных решеток с пространственно развитыми антенными элементами//Препринт Физического факультета МГУ, №11/2006, стр.1-29, 2006.

9. Ян Чунь, Саввин В.Л., Моделирование дисковых микрополосковых ректенн//Препринт Физического факультета МГУ, №14/2006, стр.1-18, 2006.

10. Саввин В.Л., Ян Чунь, Многоэлементные антенные решетки в микроволновой линии передачи энергии// Сб. тр. конф. «Научная сессия МИФИ-2007», Т. 8, 2007, С. 16-17.

Подписано к печати

Тираж _____ Заказ

Отпечатано в отделе оперативной печати
физического факультета МГУ