

На правах рукописи



Глыбовский Станислав Борисович

**Электродинамика излучающих систем на
основе тонкопроволочных сеток**

Специальность 01.04.03 — радиофизика

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург — 2013

Работа выполнена на кафедре радиофизики федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

- Научный руководитель:** доктор физико-математических наук, профессор Валерий Петрович Акимов
- Официальные оппоненты:** доктор технических наук, профессор Вендик Орест Генрихович, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) (СПбГЭТУ), кафедра физической электроники и техники
- доктор физико-математических наук
Белов Павел Александрович,
главный научный сотрудник,
заведующий лабораторией
«Метаматериалы»,
Санкт-Петербургский НИУ
Информационных технологий,
механики и оптики
- Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет» (СПбГУ)

Защита состоится 12 ноября 2013 г. в 15⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.238.08 Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина).

Автореферат разослан 11 октября 2013 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.238.08

Смирнов Е.А.

Общая характеристика работы

Актуальность темы.

Диссертационная работа посвящена решению граничных задач электродинамики, связанных с применением метода усредненных граничных условий к определению характеристик зеркальных, вибраторных и микрополосковых антенн, имеющих в своем составе тонкопроволочные сетки. Предлагается также новый способ применения сеток для подавления влияния фазовых ошибок в зеркальных антеннах.

Существует множество примеров применения регулярных структур из тонких проводников (тонкопроволочных сеток) в составе антенн и устройств СВЧ. Многие из этих примеров относятся к исследованиям последних лет. Интерес к изучению сетчатых структур в настоящее время высок благодаря появлению новых образцов антенно-фидерных устройств для современных систем связи. В данных условиях появляются новые, не рассматривавшиеся ранее вопросы электродинамики. Аналитические методы исследования сеток и устройств на их основе представлены во множестве работ как отечественных, так и зарубежных авторов. Получены строгие решения задач дифракции плоских волн на бесконечных плоских сетках с наиболее простыми конфигурациями проводников. Однако для их использования в расчетах необходимо производить «усечение» бесконечной системы алгебраических уравнений, что является громоздкой процедурой и требует построения специальных вычислительных алгоритмов. Большинство же антенн и устройств СВЧ на основе сетчатых структур являются значительно более сложными системами, и для них строгая математическая постановка задачи электродинамики оказывается затруднительной.

Часто не требуется определять поле в непосредственной близости от проводников сетки, а достаточно ограничиться рассмотрением поля на сравнительно большом расстоянии. Подобный подход, значительно упрощающий математическую постановку задачи, реализован в методе усредненных граничных условий (УГРУ). Метод применим, когда размер ячейки сетки (период) — мал по сравнению с длиной волны, а толщина проводников — много меньше периода. Несмотря на значительное число работ, посвященных применению УГРУ, многие практически важные задачи до сих пор не были решены. Кроме того, по мере возникновения новых видов антенн на основе сеток вопросы расчета их параметров приобрели актуальность. Так значительный интерес представляют новые способы применения сеток в зеркальных антеннах, а также аналитическое исследование направленных свойств антенн с сетчатыми рефлекторами. Были недостаточно изучены вопросы взаимного влияния элементов вибраторных антенных решеток над сетчатым экраном.

Особо следует отметить потребность в изучении свойств сеток в составе микрополосковых (печатных) антенн.

Целью работы является разработка аналитических методов расчета и изучение электродинамических и радиотехнических характеристик зеркальных, вибраторных и микрополосковых антенн, содержащих тонкопроволочные сетки. Для этого необходимо было решить следующие научные задачи:

1. описать аналитически отражательные свойства плоской сетки внутри слоя диэлектрика постоянной толщины, расположенного над идеально проводящей плоскостью; построить математическую модель неровного параболического зеркала и исследовать возможность коррекции фазовых ошибок с применением вторичного рефлектора на основе ламинированной сетки;
2. получить выражения для расчета взаимного сопротивления элементов вибраторной антенной решетки над сетчатым экраном;
3. получить в замкнутой форме выражение для коэффициента усиления сетчатой параболической антенны с облучателем в виде электрического диполя в фокусе;
4. вывести усредненные граничные условия для цилиндрической сетки из параллельных проводников и применить их к анализу характеристик кольцевых микрополосковых антенн с закорачивающей стенкой в виде последовательности тонких металлических штырьков.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Получены формулы для взаимного сопротивления элементов решетки из электрических диполей, а также полуволновых вибраторов над сетчатым экраном с квадратной ячейкой и над экраном из параллельных проводников.
2. Предложен метод коррекции фазовых ошибок неровного параболического зеркала путем использования вторичного рефлектора на основе ламинированной металлической сетки.
3. Исследованы коэффициенты отражения плоской электромагнитной волны от ламинированной слоем диэлектрика сетки над идеально проводящей плоскостью; с их помощью в приближении физической оптики создана модель неровного параболического зеркала, оборудованного вторичным сетчатым рефлектором для коррекции фазовых ошибок.

4. Получены выражения в замкнутой форме для коэффициента усиления зеркальной параболической антенны с сетчатым рефлектором и облучателем в виде электрического диполя; сетка имеет квадратную ячейку и идеальные контакты проводников в узлах.
5. Выведены УГРУ для сетки из параллельных проводников на цилиндрической поверхности; с их помощью получены уравнения для расчета собственных частот и распределений поля кольцевой микрополосковой антенны с закорачивающей внутренней стенкой из параллельных штырьков; получены скалярные произведения собственных распределений поля указанной структуры; решена задача возбуждения антенны коаксиально-полосковым переходом.

Научная и практическая значимость. Научная значимость данной работы заключается в том, что ее результаты распространяют метод УГРУ на исследование характеристик новых типов антенн, содержащих тонкопроволочные сетки.

Практическая значимость определяется применимостью полученных формул в расчетах при проектировании параболических сетчатых зеркал, вибраторных антенных решеток с сетчатым экраном, а также закороченных микрополосковых антенн. Предложенный метод коррекции фазовых ошибок с помощью ламинированной сетки может использоваться для расширения частотного диапазона существующих крупногабаритных зеркальных антенн. Основные результаты работы использованы автором в рамках выполнения НИР в ООО «Научный центр прикладной электродинамики».

Степень достоверности. Достоверность полученных в работе результатов обеспечивается применением основных уравнений электродинамики и апробированных методов решения ее краевых задач. Кроме того, достоверность подтверждается совпадением с известными результатами других авторов в соответствующих частных случаях, а также сопоставлением результатов расчета с экспериментальными данными и результатами моделирования в специализированных программных пакетах.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на следующих конференциях:

1. XII Всероссийская научная конференция студентов-радиофизиков (Санкт-Петербург, 2008)
2. XXXIX Международная научно-практическая конференция "Неделя Науки СПбГПУ" (Санкт-Петербург, 2010)
3. XIV Всероссийская научная конференция студентов-радиофизиков (Санкт-Петербург, 2010)

4. The 24th International Symposium on Space Terahertz Technology (Groningen, 2013)

Публикации. Основные результаты опубликованы в 4-х печатных изданиях, рекомендованных ВАК [1-4]. На предложенный в работе метод коррекции фазовых ошибок получен патент РФ на полезную модель [5]. Результаты также представлены в 3-х сборниках докладов: [6-8].

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Полный объем диссертации включает: страниц 140; рисунков 53; таблиц 2. Список литературы содержит наименований: 57.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Сетчатый экран из тонких металлических проводников оказывает значительное влияние на взаимное сопротивление элементов вибраторной антенной решетки, величина которого существенно зависит от периода сетки и радиуса проводников. Полученные соотношения позволяют учесть параметры сетчатого экрана при расчете взаимных сопротивлений вибраторов решетки.
2. Использование идеального корректирующего рефлектора на основе ламинированной сетки путем установки поверх неровного параболического зеркала позволяет значительно уменьшить негативное влияние фазовых ошибок последнего на направленные свойства системы. Эффект достигается благодаря преобладанию областей медленного изменения фазы отраженных волн над областями резонансов в объеме между исходным зеркалом и корректирующим рефлектором.
3. Достаточно глубокое сетчатое параболическое зеркало может иметь более высокий коэффициент усиления, чем аналогичное сплошное зеркало при наличии облучателя в виде электрического диполя в фокусе.
4. Электродинамические и радиотехнические свойства закороченных кольцевых микрополосковых излучателей существенно зависят от реализации закорачивающей стенки. При переходе от сплошной стенки к проводочной снижаются резонансные частоты, а поле собственных мод проникает в изолированную стенкой часть объема излучателя. Изменение свойств, определяемое расстоянием между проводниками и их радиусом, может быть рассчитано с использованием полученных уравнений.

Содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность темы диссертационной работы, приводится краткий обзор известных результатов в выбранной обла-

сти исследования, ставится цель работы, сформулированы научная новизна и практическая значимость, перечислены положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена методу коррекции фазовых ошибок неровного параболического зеркала при помощи ламинированной сетки из металлических проводников.

При наличии отклонений профиля металлического зеркала от параболоида вращения (неровностей) наблюдается быстрое снижение коэффициента усиления (КУ) с ростом частоты, что связано с фазовыми ошибками. Предлагается способ коррекции фазовых ошибок существующих крупногабаритных зеркал, который заключается в установке поверх существующего зеркала легкого вторичного рефлектора на основе ламинированной диэлектрическим слоем тонкопроволочной сетки. Форма сетки при этом предполагается идеальной (не отличающейся от параболоида вращения).

Вначале решается вспомогательная задача — исследуются отражательные свойства плоской сетки с периодом α из тонких проводников радиусом r_0 внутри слоя с диэлектрической проницаемостью ε_r . Слой с сеткой внутри расположен на некоторой высоте над идеально проводящей плоскостью (см. рисунок 1) так, что между ней и нижней поверхностью слоя существует воздушный зазор толщиной g . Для сетки выполняются условия: $\alpha \ll \lambda$; $r_0 \ll \alpha$, где λ — длина волны в слое. Также считается, что толщина слоя заметно превышает α . Тогда справедливы УГРУ, применяемые для сетки с квадратной ячейкой и идеальными контактами проводников в узлах (сетки типа 1) и для сетки из параллельных проводников (сетки типа 2). Таким образом задача сводится к анализу слоистой структуры с 4-мя границами раздела, причем взаимодействием сетки с границами слоя можно пренебречь. В результате выводятся выражения для коэффициентов отражения E- и H-поляризаций (R^{EE} и R^{HH}), а также коэффициента кросс-поляризации $R^{EH} = -R^{HE}$. Исследование зависимостей фазы R^{EE} и R^{HH} от g для сетки типа 1 показывает преобладание стационарных областей (медленного изменения), а также наличие узких резонансных областей (см. рисунок 2). Для сетки типа 2 стационарные области искажены из-за кросс-поляризационных явлений. Поэтому в целях коррекции фазовых ошибок должна использоваться именно сетка типа 1. Далее в работе обсуждается механизм быстрого изменения фазы при резонансах. Формулы R^{EE} и R^{HH} и коэффициента кросс-поляризации позволяют в приближении физ. оптики найти эквивалентные электрические \vec{j}^{eq} и магнитные \vec{K}^{eq} токи на поверхности рефлектора произ-

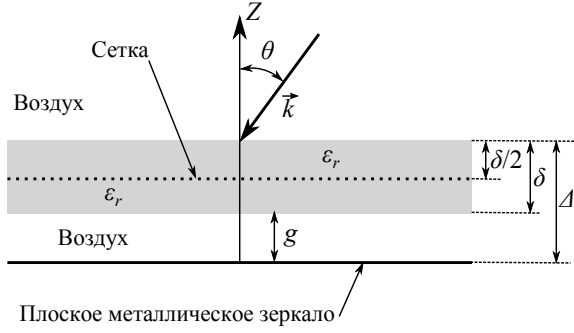


Рисунок 1 — Плоскопараллельная структура

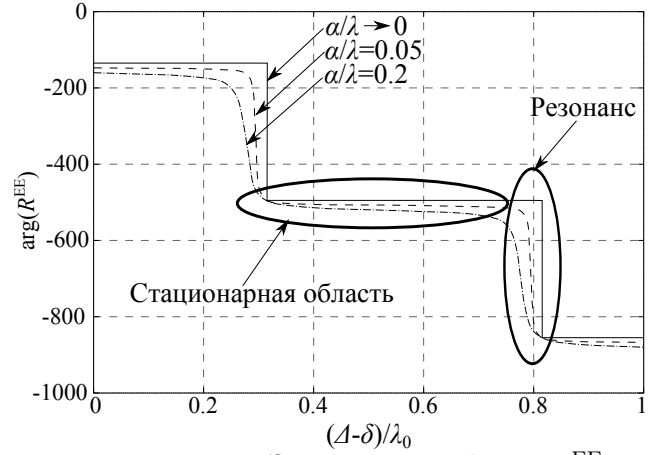


Рисунок 2 — Зависимости фазы R^{EE} от ширины воздушного зазора ($\varepsilon_r = 2$; $r_0/\alpha = 1/15$)

вольной формы:

$$\begin{aligned} \vec{j}^{\text{eq}} &= \frac{1}{\eta_0} \left[A_R \cdot \vec{\tau}^E + B_R \cdot \vec{t}^H \cos\left(\frac{\vartheta_0}{2} + \vartheta_i\right) \right] \exp\left(-i\vec{k}_0 \cdot \vec{r}\right); \\ \vec{K}^{\text{eq}} &= -\left\{ C_R \cdot \vec{\tau}^E + D_R \cdot \vec{t}^H \cos\left(\frac{\vartheta_0}{2} + \vartheta_i\right) \right\} \exp\left(-i\vec{k}_0 \cdot \vec{r}\right), \end{aligned} \quad (1)$$

где $A_R = (1 + R^{EE})E_i^E + R^{HE}E_i^H$; $B_R = (R^{HH} - 1)E_i^H + R^{EH}E_i^E$; $C_R = (1 + R^{HH})E_i^H + R^{EH}E_i^E$; $D_R = (1 - R^{EE})E_i^E - R^{HE}E_i^H$; $\vec{\tau}^E$, \vec{t}^H — единичные векторы, задающие направление касательной составляющей электрического поля для E- и H-поляризаций, соответственно; E_i^E , E_i^H — амплитуды поляризованных компонент падающей волны; ϑ_i — угол падения волны; ϑ_0 — сферический угол точки отражения в системе координат с центром в фокусе; k_0 и η_0 — волновое число и сопротивление в вакууме; \vec{r} — радиус-вектор точки отражения.

Далее рассматривается параболическое зеркало с неровностями, поверхность которого установлен корректирующий рефлектор (КР) из ламинированной сетчатой поверхности S_0 идеальной параболической формы (рисунок 3). Диаметр апертуры равен D , а фокусное расстояние — F . Внешняя поверхность S ламинирующего слоя, на которой определяются \vec{j}^{eq} и \vec{K}^{eq} уже не является параболической, что учитывается. С помощью (1) выражение для поля \vec{E} вблизи фокуса параболоида сетки выводится на основе интеграла Кирхгофа (2).

$$(\vec{E} \cdot \vec{a}) = \int_S \left[(\vec{j}^{\text{eq}} \cdot \vec{E}^D) - (\vec{K}^{\text{eq}} \cdot \vec{H}^D) \right] dS, \quad (2)$$

где \vec{E}^D , \vec{H}^D — поля электрического диполя с моментом \vec{a} , расположенного в точке наблюдения. Интегрирование производится в сферической системе координат $(R, \vartheta_0, \varphi)$ с центром в фокусе и направлением $\vartheta_0 = 0$ вдоль оси OZ . Затем по уровню основной компоненты поля определяется КУ антенны.

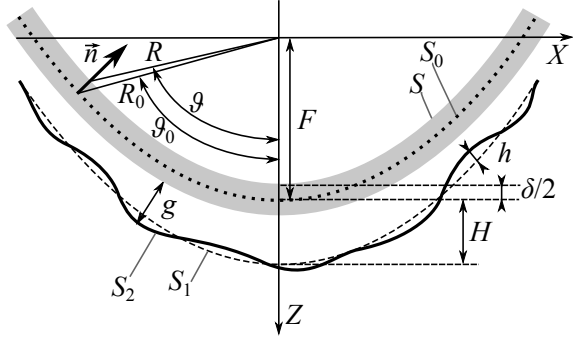


Рисунок 3 — Неровное параболическое зеркало, оборудованное установленным поверх сетчатым КР

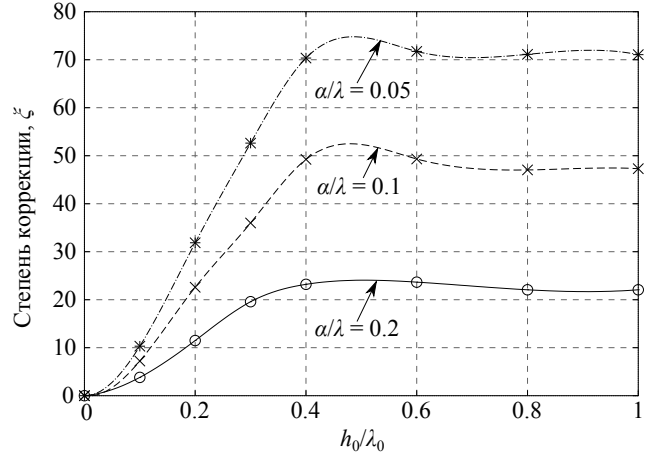


Рисунок 4 — Зависимости ξ от амплитуды неровностей

Неровности первичного зеркала учитываются с помощью метода реализаций случайной функции $h(\vartheta_0, \varphi)$ с заданной амплитудой h_0 и радиусом корреляции, много большим длины волны. При наличии неровностей выражение для ширины воздушного зазора, входящее в полученные формулы для коэффициентов отражения, имеет вид:

$$g(\vartheta_0, \varphi) = H \cos \frac{\vartheta_0}{2} - \frac{\delta}{2} - h(\vartheta_0, \varphi). \quad (3)$$

Для множества реализаций $h(\vartheta_0, \varphi)$ с помощью (2) рассчитываются реализации распределения поля вблизи фокуса с последующим их усреднением по выборке.

Отношение потерь в КУ антенны с неровным зеркалом в отсутствие КР (ΔG^{Me}) к аналогичной величине при наличии КР (ΔG^{Corr}) назовем корректирующей способностью: $\xi = \frac{\Delta G^{\text{Me}}}{\Delta G^{\text{Corr}}}$. Проведенные расчеты показывают, что ξ может достигать нескольких десятков при амплитуде неровностей зеркала порядка длины волны в вакууме. Графики зависимости ξ от h_0 при различных значениях плотности сетки α/λ показаны на рисунке 4. В отсутствие КР неровности с $h_0 \approx \lambda_0$ приводят к чрезмерным фазовым ошибкам, распределенным по всей площади зеркала. В случае же коррекции фаза отраженных волн в различных точках поверхности рефлектора остается почти одинаковой благодаря преобладанию стационарных областей. Исключение составляют резонансные области, площадь которых сравнительно мала, и с ростом h_0 почти не изменяется (несмотря на их реконфигурацию).

Сказанное подтверждает возможность использования вторичного сетчатого рефлектора для коррекции фазовых ошибок существующих крупногабаритных зеркал с целью перехода в более высокочастотный рабочий диапазон.

Вторая глава посвящена выводу аналитического выражения для КУ сетчатой параболической антенны произвольной глубины.

Рефлекторы параболических зеркальных антенн часто изготавливаются из тонкопроволочной металлической сетки, что имеет целый ряд эксплуатационных преимуществ по сравнению со сплошными зеркалами. Аналитическое исследование направленных свойств сетчатого параболического зеркала проводилось ранее в приближении постоянного поверхностного импеданса методом интегральных уравнений, а также с использованием коэффициентов отражения методом физической оптики. Однако при этом предполагалось, что отражательные свойства сетки можно считать одинаковыми в разных точках зеркала, что справедливо, строго говоря, лишь для рефлекторов с большим отношением фокусного расстояния F к диаметру апертуры D (т.н. мелких зеркал). Произвольное же соотношение F/D ранее не рассматривалось и представляет значительный интерес.

Исследуемая система показана на рисунке 5. Рассматривается одиночное сетчатое зеркало (идеальный параболоид вращения с радиусом кривизны в каждой точке, многократно превышающим длину волны, фокусным расстоянием F и апертурой диаметром D) в режиме приема. Поверхность представляет собой сетку с квадратной ячейкой размером $\alpha \ll \lambda_0$ из тонких пересекающихся проводников радиусом сечения $r_0 \ll \alpha$. Поле падающей волны — плоская ЭМВ, поляризованная вдоль оси OX . Подобное зеркало

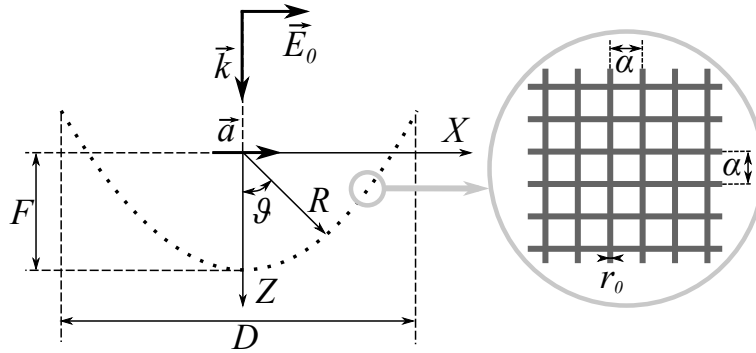


Рисунок 5 — Дифракция плоской ЭМВ на сетчатом параболоиде

является частным случаем структуры, показанной на рисунке 3. Поэтому за основу взяты формулы для поля вблизи фокуса, полученные в первой главе. При этом рассматривается падение волны вдоль оси параболоида, а точка наблюдения выбирается строго в его фокусе. При этом выражение для основной компоненты поля E_x существенно упрощается и может быть приведено к следующему виду:

$$E_x = ik_0 F E_0 \int_0^{\vartheta_{\max}} \operatorname{tg} \frac{\vartheta}{2} \left[\cos \vartheta \cdot R^{\text{EE}} \left(\frac{\vartheta}{2} \right) - R^{\text{HH}} \left(\frac{\vartheta}{2} \right) \right] d\vartheta, \quad (4)$$

где $R^{\text{EE}}\left(\frac{\vartheta}{2}\right) = \frac{\cos\frac{\vartheta}{2}}{\cos\frac{\vartheta}{2} + i2\kappa(1 + \Psi - \frac{1}{2}\sin^2\frac{\vartheta}{2})}$; $R^{\text{HH}}\left(\frac{\vartheta}{2}\right) = \frac{-1}{1 + i2\kappa\cos\frac{\vartheta}{2}(1 + \Psi)}$ — коэффициенты отражения от сетки; $\vartheta_{\text{max}} = 2 \arctg \frac{D}{4F}$; $\kappa = \frac{\alpha}{\lambda_0} \ln \frac{\alpha}{2\pi r_0}$ — параметр сетки. Величина Ψ учитывает скин-эффект и потери в проводниках сетки. Интеграл (4) путем замены переменных и разложения на рациональные дроби может быть взят аналитически, что приводит в выражению для E_x в замкнутой форме. КУ определяется как отношение $|E_x|^2$ к $|E_0|^2$, где E_0 — амплитуда падающей волны. Подобное определение КУ соответствует по принципу взаимности облучению сетчатого зеркала расположенным в его фокусе электрическим диполем. Отношение КУ сетчатого зеркала к КУ аналогичного сплошного зеркала обозначим ν . Для величины ν получены выражения с учетом омических потерь, однако наиболее простой вид они принимают в отсутствии потерь (при $\Psi = 0$):

$$\begin{aligned} \nu = \frac{1}{(C^2-1)^2} \left\{ \left[\frac{1}{2\kappa} \left(\frac{3\kappa+2\gamma_1}{\sqrt{4\kappa^2+1}} \ln \frac{C^2+\gamma_1^2}{1+\gamma_1^2} - \frac{3\kappa-2\gamma_2}{\sqrt{4\kappa^2+1}} \ln \frac{C^2+\gamma_2^2}{1+\gamma_2^2} \right) + \ln C - \right. \right. \\ \left. \left. - \frac{1}{2} \ln \frac{1+4\kappa^2 C^2}{1+4\kappa^2} \right]^2 + \left[\frac{1}{\kappa} \left(2C - 2 + \frac{3\kappa+2\gamma_1}{\sqrt{4\kappa^2+1}} \left(\arctg \frac{1}{\gamma_1} - \arctg \frac{C}{\gamma_1} \right) + \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. + \frac{3\kappa-2\gamma_2}{\sqrt{4\kappa^2+1}} \left(\arctg \frac{1}{\gamma_2} - \arctg \frac{C}{\gamma_2} \right) \right) + \arctg 2C\kappa - \arctg 2\kappa \right]^2 \right\}, \end{aligned} \quad (5)$$

где $\gamma_{1,2} = \frac{\sqrt{4\kappa^2+1} \pm 1}{2\kappa}$; $C = \cos(\vartheta_{\text{max}}/2) = \sqrt{1 + \frac{D^2}{16F^2}}$.

Исследование зависимостей ν от F/D показало, что при $F/D \gg 1$ $\nu \rightarrow |R^{\text{EE}}(0)|^2$, где $R^{\text{EE}}(0)$ — коэффициент отражения от плоской сетки при нормальном падении волны. Соответствующие кривые на рисунке 6 приближаются к прямым линиям. Данный предел отражает известные ранее результаты для мелких зеркал. С уменьшением $F/D < 1$ величина ν заметно растет

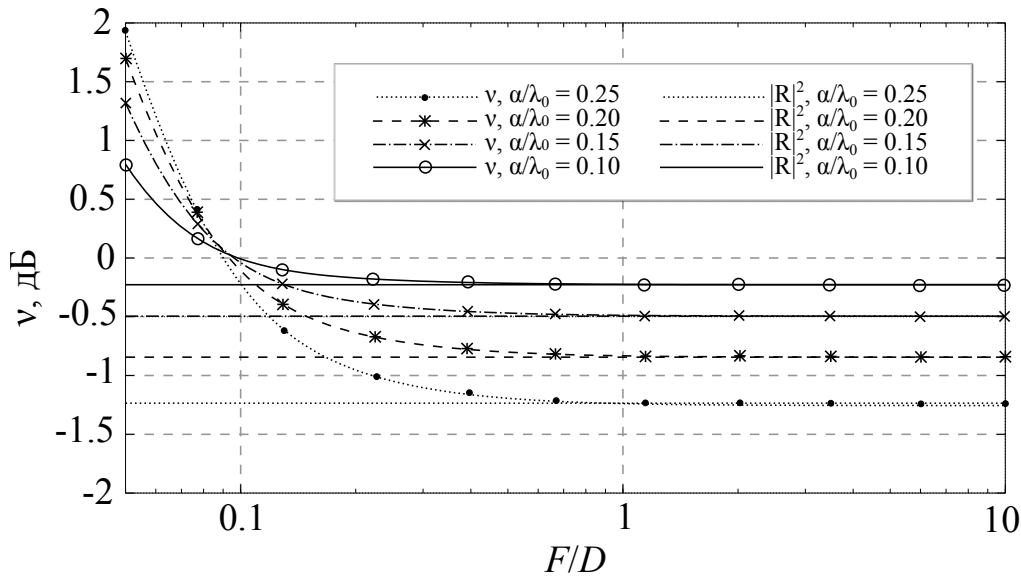


Рисунок 6 — Зависимость ν от F/D для различных значений плотности сетки

и даже становится больше единицы. Указанные результаты означают, что КУ

достаточно глубокого сетчатого зеркала может быть выше КУ соответствующего сплошного зеркала. Данный факт объясняется тем, что интенсивность противофазных поверхностных токов, присущих глубоким зеркалам, уменьшается за счет особенностей взаимодействия поляризованного поля с сеткой.

В третьей главе рассматриваются вопросы взаимодействия элементов вибраторных антенных решеток над сетчатым экраном.

Входное сопротивление элементов вибраторной антенной решетки, расположенной над сетчатым экраном, зависит от их амплитуды и фазы за счет взаимодействия по полю. Каждый элемент при этом испытывает не только влияние собственного поля соседних элементов, но и поля наведенных соседними элементами токов на проводниках сетки. Расчет входного сопротивления элементов с учетом их взаимодействия для произвольного амплитудно-фазового распределения производится с помощью комплексного взаимного сопротивления, определению которого и посвящена данная глава.

Поле токов, наведенных на проводниках сетчатого экрана, ищется с применением УГРУ методом мнимых изображений. Сетка имеет период $\alpha \ll \lambda_0$ и радиус проводников $r_0 \ll \alpha$. Поле токов сетки рассматривается как поле эквивалентного источника, расположенного в комплексном пространстве (мнимого изображения). Предполагается, что форма распределения токов вибраторов — такая же, как и в свободном пространстве. Это позволяет считать, что каждый элемент формирует собственное мнимое изображение независимо от других, а также делает возможным использование метода наведенных ЭДС для расчета взаимного сопротивления:

$$Z_{ij} = Z_{ij}^0 + \Delta Z_{ij}, \quad (6)$$

где Z_{ij}^0 — взаимное сопротивление элементов с номерами i и j в свободном пространстве; ΔZ_{ij} — изменение взаимного сопротивления за счет присутствия сетчатого экрана.

Для решетки одинаково ориентированных идентичных вибраторов достаточно рассмотреть взаимное сопротивление пары элементов на произвольном расстоянии a между их центрами и высоте h расположения над экраном. Тогда Z_{12}^0 определяется полем соседнего элемента в свободном пространстве, а ΔZ_{12} — полем его мнимого изображения.

Применение метода мнимых изображений приводит к интегральной форме выражения для ΔZ_{12} . В качестве примера рассмотрим систему двух соосных полуволновых вибраторов над сеткой из параллельных тонких проводников (см. рисунок 7). Выражение для ΔZ_{12} для указанной пары вибра-

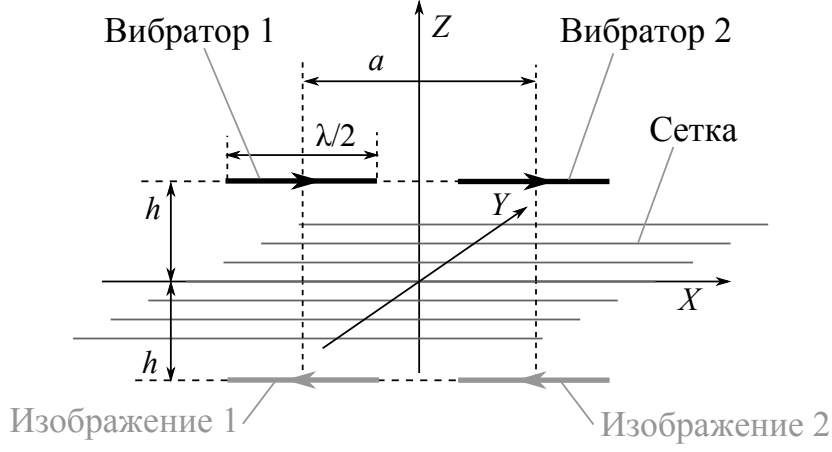


Рисунок 7 — Два соосных полуволновых вибратора над сеткой из параллельных проводников

торов имеет следующий вид:

$$\Delta Z_{12} = A \int_{-l}^l \left\{ \left[\cos \frac{\pi r}{l} (l - |r|) + \frac{l}{\pi} \sin \frac{\pi |r|}{l} \right] \int_0^{\infty} g(r, t) \exp \left(\frac{ik_0 t}{2\kappa} - ik_0 d \right) dt \right\} dr, \quad (7)$$

где $A = -\frac{k_0}{16\omega\varepsilon_0\pi\kappa}$; $g(r, t) = k_0^2 d^{-1} - d^{-5} \cdot \{d^2 [1 + k_0^2 (a+r)^2] - 3(a+r)^2 + ik_0 d [d^2 - 3(a+r)^2]\}$; $d = d_1 + id_2 = \sqrt{(a+r)^2 + (2h-it)^2}$ — комплексное расстояние; $\kappa = \frac{\alpha}{\lambda_0} \ln \frac{\alpha}{2\pi r_0}$ — параметр сетки; $l = \lambda_0/2$.

Мнимое изображение полуволнового вибратора в физическом пространстве распределено вдоль зеркально отраженного отрезка длиной l , но имеет также распределение на полубесконечном интервале вдоль дополнительной мнимой оси t . Обеспечить быструю сходимость интеграла (7) по переменной t можно, выбирая выражение для d в форме:

$$\begin{aligned} d_1 &= \left\{ \frac{[(a+r)^2 + 4h^2 - t^2]^2 + 16h^2 t^2}{4} \right\}^{\frac{1}{4}} \sqrt{1 + \frac{(a+r)^2 + 4h^2 - t^2}{\sqrt{[(a+r)^2 + 4h^2 - t^2]^2 + 16h^2 t^2}}}; \\ d_2 &= - \left\{ \frac{[(a+r)^2 + 4h^2 - t^2]^2 + 16h^2 t^2}{4} \right\}^{\frac{1}{4}} \sqrt{1 - \frac{(a+r)^2 + 4h^2 - t^2}{\sqrt{[(a+r)^2 + 4h^2 - t^2]^2 + 16h^2 t^2}}}. \end{aligned} \quad (8)$$

На рисунке 8 представлены примеры результатов расчета ΔZ_{12} с использованием (7-8).

Подобные результаты получены для следующих типов расположения элементов:

Горизонтальные вибраторные антенны над сеткой из параллельных проводников (антенны параллельны направлению проводников):

- Два коллинеарных электрических диполя
- Два коллинеарных полуволновых вибратора

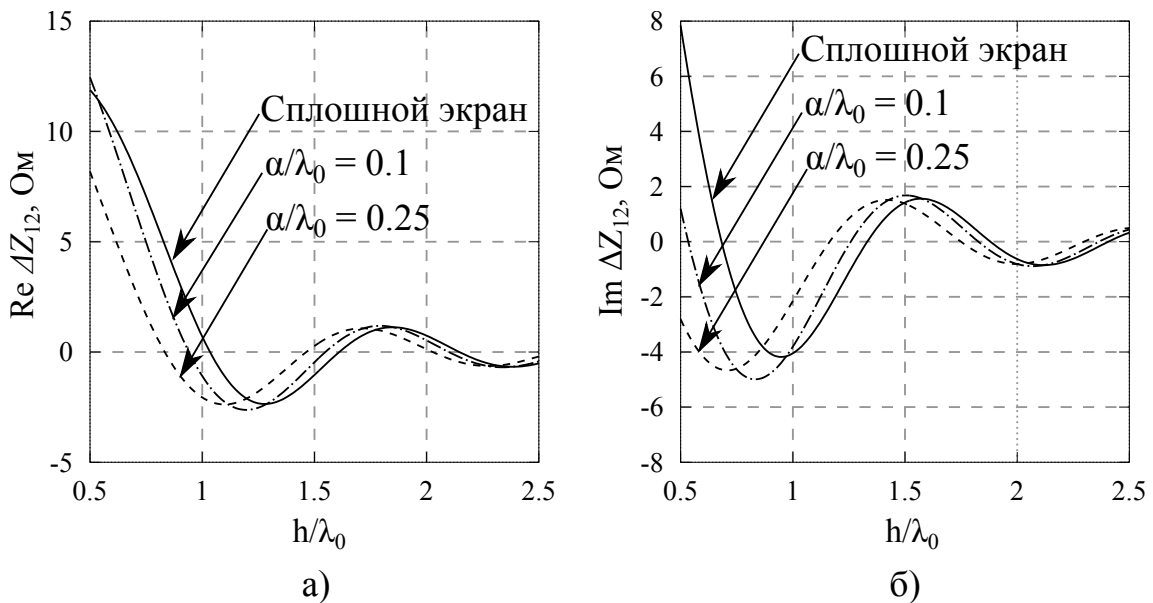


Рисунок 8 — Графики зависимости ΔZ_{12} от высоты расположения вибраторов над сетчатым экраном: а — вещественная часть, б — мнимая часть

- Два параллельных электрических диполя
- Два параллельных полуволновых вибратора

Вертикальные вибраторные антенны над сеткой пересекающихся проводников с квадратной ячейкой:

- Два параллельных электрических диполя
- Два параллельных полуволновых вибратора

В каждом случае рассчитаны графики зависимости ΔZ_{12} от a , а также от h . Полученные данные могут использоваться при проектировании вибраторных антенных решеток с сетчатым экраном.

Четвертая глава посвящена исследованию кольцевых микрополосковых антенн, содержащих закорачивающие структуры в виде последовательности тонких металлических проводников.

Работы многих авторов показали преимущества использования закороченных микрополосковых (печатных) антенн с различной формой полоска. Наибольшее распространение получили кольцевые закороченные микрополосковые антенны (ЗМА) с полоском в форме диска. В таких антеннах полосок соединяется с плоскостью заземления закорачивающей металлической стенкой цилиндрической формы (см. рисунок 9а). В печатной реализации закорачивающая стенка часто образована последовательностью тонких металлических штырьков, образующих сетчатую структуру (рисунок 9б). В существующих работах авторы при анализе считают подобную стенку сплошной

и идеально проводящей при достаточно малом расстоянии между штырьками, т.е. пренебрегают сетчатым характером проволочной стенки. В данной

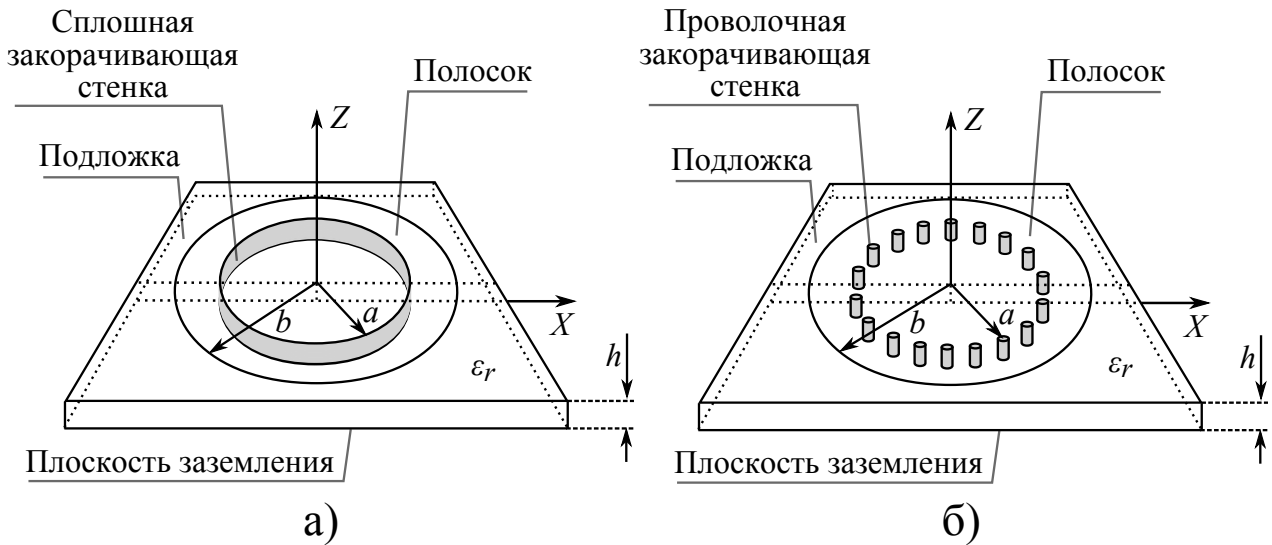


Рисунок 9 — Кольцевые ЗМА: а — со сплошной закорачивающей стенкой, б — с проволочной закорачивающей стенкой

главе исследуется влияние параметров проволочной закорачивающей стенки — периода и радиуса ее проводников на параметры антенны с полоском в виде диска радиуса b , показанной на рисунке 9б. В данном случае сетчатая структура состоит из параллельных тонких проводников, расположенных на цилиндрической поверхности радиуса $a < b$. Расстояние между центрами соседних проводников равно $a \cdot \Delta\varphi \ll \lambda$, где $\Delta\varphi$ — угловой период сетчатой структуры; радиус проводников равен $r_0 \ll a \cdot \Delta\varphi$. Подложка с диэлектрической проницаемостью ϵ_r является достаточно тонкой ($h \ll \lambda, a, b$).

Для описания сетки выводятся и затем используются УГРУ для параллельной проводникам компоненты E_z электрического поля на цилиндрической поверхности $\rho = a$ в предположении $\Delta\varphi \ll 1$:

$$E_z = i\eta\kappa_c \left(j_z + \frac{1}{k^2} \frac{\partial^2 j_z}{\partial z^2} \right), \quad (9)$$

где: $\eta = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0\epsilon_r}}$ — волновое сопротивление материала подложки; $\kappa_c = \frac{a\Delta\varphi}{\lambda} \ln \frac{a\Delta\varphi}{2\pi r_0}$ — параметр сетки; $k = 2\pi/\lambda$; λ — длина волны в диэлектрике; \vec{j} — усредненная в пределах периода сетчатой структуры плотность поверхностных токов.

Для описания краевого эффекта на внешней границе дискового полоска используется метод эквивалентного резонатора с магнитной стенкой, согласно которому резонансные частоты антенны равны резонансным частотам замкнутого резонатора с тем же заполняющим материалом, что и материал подложки, но внешней границей в виде магнитной стенки радиуса $b_{\text{eff}} > b$.

Изложенный подход позволяет свести задачу расчета собственных частот и распределений поля антенны к внутренней краевой задаче электродинамики с двумя концентрическими областями, связанными на поверхности сетки. Решение однородного уравнения Гельмгольца методом разделения переменных приводит к трансцендентному характеристическому уравнению, учитывающему параметры сетчатой структуры:

$$J_m(ka) \cdot [-J'_m(kb_{eff})N_m(ka) + N'_m(kb_{eff})J_m(ka)] - \kappa_c J'_m(kb_{eff}) \cdot [-J_m(ka)N'_m(ka) + J'_m(ka)N_m(ka)] = 0, \quad (10)$$

где $J_m(\rho)$, $N_m(\rho)$ — функции Бесселя и Неймана порядка m , а J'_m , N'_m — их производные по аргументу.

Для случая достаточно близких штырьков ($\kappa_c \ll 1$) выражение для сдвига резонансных частот при переходе от сплошной закорачивающей стенки к проволочной было получено в замкнутой форме. Также были получены выражения в цилиндрической системе координат (ρ, φ, z) для расчета собственных распределений поля, соответствующих различным модам антенны с индексами m, n :

$$\begin{aligned} E_{z,1}^{m,n} &= D J_m(k_{m,n}\rho) \cdot \begin{Bmatrix} \sin m\varphi \\ \cos m\varphi \end{Bmatrix} \cdot \left[1 - \frac{J'_m(k_{m,n}b_{eff})N_m(k_{m,n}a)}{J_m(k_{m,n}a)N'_m(k_{m,n}b_{eff})} \right]; \\ E_{z,2}^{m,n} &= D \cdot \begin{Bmatrix} \sin m\varphi \\ \cos m\varphi \end{Bmatrix} \cdot \left[J_m(k_{m,n}\rho) - \frac{J'_m(k_{m,n}b_{eff})}{N'_m(k_{m,n}b_{eff})} N_m(k_{m,n}\rho) \right], \end{aligned} \quad (11)$$

где $E_{z,1}$ — поле во внутренней (центральной) части эквивалентного резонатора; $E_{z,2}$ — поле во внешней (периферийной) части; D — нормировочный множитель; $k_{m,n}$ — решение уравнения (10) для рассматриваемой моды.

Далее решается задача о возбуждении рассматриваемой антенны коаксиально-полосковым переходом в виде тонкого штырька с током I на расстоянии c от центра антенны при $\varphi = 0$, причем $a < c < b$. Соответствующая задача сводится к решению неоднородного уравнения Гельмгольца:

$$\nabla^2 E_z + k^2 E_z = i\omega\mu_0 I \delta(\rho - c) \delta(c \cdot \varphi). \quad (12)$$

Уравнение (12) решается методом разложения по собственным распределениям поля (11). Количество рассматриваемых мод ограничивается, а их комплексные амплитуды рассчитываются обращением матрицы. Для решения задачи выводятся формулы для скалярного произведения двух произвольных мод различных индексов с весом ρ . Решение задачи позволяет рассчитать входное сопротивление антенны в диапазоне частот на основании уравнения баланса энергии.

Для проверки полученных формул проведен эксперимент по измерению характеристик шести образцов антенн, отличающихся параметрами закорачивающей проволочной стенки. Остальные же параметры образцов выбраны одинаковыми: $h = 0.508$ мм; $a = 27.2$ мм; $b = 47.5$ мм; $\varepsilon_r = 3.55$. Также

теоретические данные сравнивались с результатами моделирования методом конечных элементов в программе ANSYS HFSS.

Было показано, что в зависимости от толщины проводников и периода их следования резонансные частоты могут меняться более, чем на 25%. Сказанное означает необходимость учета эффекта «сетчатости» закорачивающей стенки при разработке подобных антенн. Сравнение резонансных частот, полученных при помощи уравнения (10), с данными эксперимента приведено на рисунке 10. Также показаны результаты моделирования исследуемых образцов антенн, а также их эквивалентных резонаторов в HFSS. Все величины относятся к первым двум модам: TM_{01} и TM_{11} . Точность совпадения теоре-

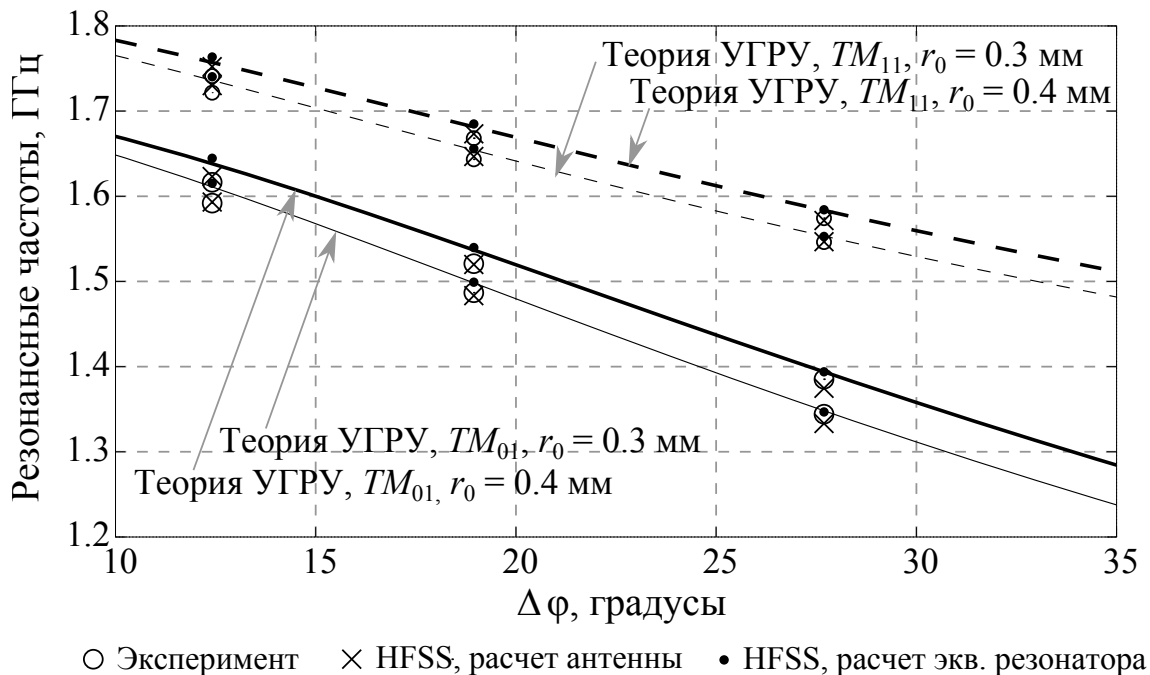


Рисунок 10 — Сравнение теоретических результатов расчета резонансных частот с данными эксперимента и моделирования в HFSS

тических значений с измеренными для двух первых мод каждой из антенн — не хуже 1,5%. Далее в работе исследуется эффект проникновения поля в центральную часть антенны. Результаты расчета распределения поля основной моды совпадают с полученными в HFSS. Найденные частотные зависимости входного сопротивления антенн с высокой точностью повторяют ход измеренных.

Все проведенные сравнения подтверждают применимость метода УГРУ в задачах анализа микрополосковых излучателей, содержащих тонкопроволочные сетчатые структуры.

В **заключении** сформулированы основные результаты диссертационной работы.

Список опубликованных работ по теме диссертации

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК России:

1. Акимов В.П., Глыбовский С.Б. Влияние сетчатых экранов на изменение параметров вибраторных антенн // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. — 2009. — Т. 92, № 6. — С. 41–46.
2. Акимов В.П., Глыбовский С.Б., Дубрович В.К. Отражающая поверхность на основе ламинированной сетки из металлических нитей для коррекции неровностей рефлекторов зеркальных антенн // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. — 2011. — Т. 126, № 3. — С. 52–60.
3. Акимов В.П., Глыбовский С.Б., Щесняк С.С. Коррекция фазовых ошибок параболического зеркала с помощью вторичного сетчатого рефлектора // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. — 2012. — Т. 152, № 4. — С. 45–50.
4. Акимов В.П., Глыбовский С.Б., Дубрович В.К. Коэффициент усиления сетчатых рефлекторных параболических антенн произвольной глубины // Письма в Журнал технической физики. — 2013. — Т. 39, № 4. — С. 61–67.

Другие публикации и материалы международных и всероссийских конференций:

5. Патент РФ на полезную модель №113079 Дубрович В.К., Акимов В.П., Глыбовский С.Б. Корректирующий рефлектор зеркальной антенны. — 2012. — опубл. 27 Января, 2012.
6. Глыбовский С.Б. Влияние сетчатого экрана на входное сопротивление проволочных антенн // XII Всероссийская научная конференция студентов-радиофизиков: Докл. — Изд. Политехн. Ун-та, 2008. — С. 3832–3835.
7. Глыбовский С.Б. Коррекция профиля параболического рефлектора с помощью ламинированной сетки из металлических нитей // XIV Всероссийская научная конференция студентов-радиофизиков: Докл. — СПб: Соло, 2010. — С. 16–18.
8. Глыбовский С.Б. Применение ламинированной металлической сетки для коррекции профиля рефлектора зеркальной антенны // XXXIX Неделя Науки СПбГПУ: Докл. — Изд-во Политехн. университета, 2010.