

Учреждение образования
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

УДК 621.396.67

МОСКАЛЁВ

Дмитрий Викторович

**АНТЕННЫЕ РЕШЁТКИ СО СЛОЖНЫМИ
ИЗЛУЧАЮЩИМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

по специальности 05.12.07 – Антенны, СВЧ-устройства и их технологии

Минск 2013

Работа выполнена в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Научный руководитель **Юрцев Олег Анатольевич**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры антенн и устройств СВЧ учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Официальные оппоненты: **Кудин Виктор Пантелеевич**, доктор технических наук, доцент, заместитель директора по научной работе, заместитель главного конструктора Республиканского научно-производственного унитарного предприятия «Луч»

Демидчик Валерий Иосифович, кандидат технических наук, доцент, зам. декана факультета радиофизики и компьютерных технологий Белорусского государственного университета

Оппонирующая организация

ГУ «НИИ Вооружённых Сил Республики Беларусь»

Защита диссертации состоится 12 декабря 2013 г. в 14.00 на заседании совета по защите диссертаций Д 02.15.02 при учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6, корп. 1, ауд. 232, тел.: 293-89-89, e-mail: dissovet@bsuir.by.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

КРАТКОЕ ВВЕДЕНИЕ

В литературе в недостаточном объёме представлены вопросы, касающиеся влияния формы раскрыва на характеристики плоской антенной решётки. В диссертационной работе подробно изучено влияние формы раскрыва на характеристики решётки и её энергетическую эффективность. Такие факторы, как случайные ошибки расположения и возбуждения излучателей, а также выход из строя излучающих элементов негативно сказываются на параметрах всей радиосистемы. В работе впервые проведен статистический анализ плоских решёток со сложными формами раскрыва, изучено влияние выхода из строя модулей в многомодульной решётке на её параметры. Исследовано влияние взаимодействия между излучателями на характеристики решётки при наличии неисправных элементов.

Для нашей республики в последнее время актуальной является задача расширения и оптимизации областей радиолокационного покрытия, особенно на низких высотах. Для её решения необходимы новые радиолокационные системы с круговым типом обзора. Как правило, такие системы реализуют в виде конформных цилиндрических антенных решёток (ЦАР). Улучшение характеристик цилиндрической антенной решётки позволит улучшить качества всей радиолокационной системы, поэтому это важная и актуальная задача. В диссертационной работе рассмотрены способы решения этой задачи за счёт выбора ширины диаграммы направленности (ДН) элементарного излучателя. Помимо этого, в работе детально исследованы параметры многогранной антенной решётки (МАР) при фазовом и конформном сканировании. С разных точек зрения показано, что многогранная решётка является полноценной заменой цилиндрической решётки в качестве системы кругового обзора, но в то же время имеет более простую и удобную для реализации конструкцию.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами (проектами) и темами

Исследования проводились в рамках:

- ОКР (шифр «Роса-РБ» № 25/62013 от 24.05.2006 г.) в ОАО КБ «Радар» – управляющей компании «Системы радиолокации»;
- НИР «Разработка методов и технологий создания аналоговых компонентов твердотельной АФАР для радиолокационного модуля, размещаемого на мобильных носителях, в части разработки системы автоматизированного проектирования (САПР) АФАР» шифр «Траектория 3.1.3» по программе Союзного государства в ОАО КБ «Радар» – управляющей компании «Системы радиоло-

кации»;

– НИР «Разработка методов проектирования фазированных антенных решеток с изготовлением макета фрагмента антенной решётки» – ГБЦ № 11-3080 в НИЛ 1.6 БГУИР.

Цель и задачи исследования

Целью работы является:

– разработка математической модели антенной решётки обобщенной схемы построения, позволяющей численно моделировать антенные решётки с разной формой раскрыва, разной формой поверхности расположения излучателей, разными типами излучателей и учитывающей влияние различных нестабильностей на характеристики решётки;

– выявление закономерностей во влиянии на параметры плоских антенных решеток со сложной формой раскрыва и антенных решеток с конформным типом сканирования случайных ошибок возбуждения излучателей по фазе и амплитуде, ошибок расположения излучателей и выхода излучателей из строя, геометрических параметров элементов решеток и типов излучателей.

Для достижения указанной цели были поставлены и решены следующие задачи:

1. Разработана математическая модель антенной решётки обобщенной схемы построения, позволяющая:

– численно анализировать линейные и плоские антенные решётки с различной формой раскрыва, кольцевые, цилиндрические, конические, пирамидальные, многоугольные и многогранные антенные решётки; антенные решётки указанных типов из вибраторных, рамочных излучателей с учётом взаимодействия в составе решётки; решётки, состоящие из излучателей с заданной шириной главного лепестка диаграммы направленности;

– учитывать случайные ошибки возбуждения излучателей по амплитуде и фазе, положению в пространстве по трём ортогональным координатам. Учитывать вышедшие из строя излучатели. Осуществлять фокусировку решётки на заданное расстояние.

2. Проведено численное моделирование плоских антенных решеток с различной формой раскрыва в широких диапазонах изменения амплитудного распределения. Сделана оценка энергетической эффективности плоских решеток с различной формой раскрыва. Проведен подробный статистический анализ решеток с различными формами раскрыва.

3. Исследована зависимость параметров цилиндрической антенной решётки от ширины главного лепестка ДН элементарного излучателя. Исследовано конформное и фазовое сканирование в многогранной антенной решётке. На

базе статистического анализа проведено сравнение электрических параметров цилиндрической и многогранной антенных решёток.

4. Исследовано влияние выхода из строя излучателей на характеристики плоских решёток с различной формой раскрыва, цилиндрических и многогранных антенных решёток. В прямоугольной многомодульной антенной решётке исследовано влияние выхода из строя модулей (подрешёток). Рассмотрены различные типы отказов излучателей: обнуление амплитуды и скачок фазы на 180° . На примере линейной антенной решётки исследовано влияние выхода из строя излучателей с учётом их взаимодействия.

Объектом исследования являются плоские антенные решётки и решётки с конформным типом сканирования.

Предметом исследования – математическая модель и параметры вышеуказанных решёток при различных условиях.

Положения, выносимые на защиту

1. Математическая модель антенной решётки обобщённой схемы построения, основанная на теореме перемножения диаграмм направленности, интегральном уравнении для тока в тонкопроволочном приближении и методе векторного потенциала, позволяющая:

- численно анализировать линейные и плоские антенные решётки с различной формой раскрыва; кольцевые, цилиндрические, конические, пирамидальные, многоугольные и многогранные антенные решётки; антенные решётки указанных типов из вибраторных, рамочных излучателей с учётом взаимодействия в составе решётки, а также излучателей с заданной шириной главного лепестка диаграммы направленности;

- учитывать случайные ошибки возбуждения излучателей по амплитуде и фазе (медленные и быстрые, межканальные и внутриканальные), ошибки положения в пространстве по трём ортогональным координатам без ограничения на величину ошибок;

- осуществлять фокусировку решётки на заданное расстояние.

Программная реализация данной модели отличается от известных, обычно применяемых коммерческих программ CST Microwave Studio, HFSS, FEKO тем, что требует для решения задачи анализа меньше времени в 10 – 1000 раз (выигрыш зависит от числа излучателей в решётке) и меньшего в несколько раз объёма оперативной памяти компьютера, а также позволяет рассчитывать решётки сложных форм и больших волновых размеров.

2. Новые, не описанные в литературе закономерности:

- особенности влияния амплитудного распределения возбуждения излучателей на характеристики плоских решёток с разной формой раскрыва;

- особенности влияния случайных ошибок возбуждения излучателей по амплитуде и фазе: быстрых и медленных, межканальных и внутриканальных;
- особенности влияния ошибок возбуждения, положения излучателей и выхода из строя элементов на параметры цилиндрических, многогранных и плоских решёток с различной формой раскрыва;
- особенности влияния параметров амплитудного распределения на чувствительность плоских решёток с различными формами раскрыва к случайным ошибкам;
- влияние взаимосвязи между излучателями на характеристики линейной антенной решётки при наличии вышедших из строя излучателей;
- влияние ошибок возбуждения и выхода из строя излучателей на параметры прямоугольной решётки при различных типах излучателей;
- особенности влияния ширины главного лепестка ДН элементарного излучателя на уровень максимального и среднеквадратичного бокового излучения в ЦАР для различных амплитудных распределений;
- особенности фазового и конформного сканирования в многогранных антенных решётках;
- зависимость энергетической эффективности антенных решёток от параметров амплитудного распределения и формы поверхности расположения излучателей.

Личный вклад соискателя

Соискателем самостоятельно разработана математическая модель, положенная в основу работы. На базе математической модели разработано программное обеспечение, позволяющее моделировать различные типы антенных решёток. Соискатель выполнил основную часть исследований, вошедших в диссертацию. Провёл анализ полученной информации и сформулировал конечные результаты.

Основным соавтором в опубликованных работах является научный руководитель – доктор технических наук, профессор О.А. Юрцев, который оказал существенную помощь в определении направлений исследований и анализе полученных результатов. Совместно с ним проделана работа по таким вопросам, как:

- особенности влияния ошибок возбуждения по фазе: быстрых, медленных, межканальных, внутриканальных;
- исследование энергетического коэффициента в прямоугольных, эллиптических и восьмиугольных решётках;
- исследование влияния выхода из строя модулей на параметры многомодульной прямоугольной решётки.

Совместно с А.П. Юбко и Н.М. Наумовичем проводились исследования энергетической эффективности в плоских решётках с различной формой раскрыва. Совместно с В.В. Кизименко исследовались влияния отказавших модулей на характеристики прямоугольной многомодульной антенной решётки и влияния случайных ошибок на характеристики антенных решёток.

Апробация результатов диссертации

Теоретические и практические результаты исследований, вошедших в диссертацию, докладывались и обсуждались на следующих конференциях: 43, 44, 45, 46, 48-я научно-технические конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР (Минск, 2007–2012); 3-й Международный радиоэлектронный форум «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития» МРФ-2008 (Харьков, 2008); 7th International Conference on Antenna Theory and Techniques (Lviv, 2009); 10-я Военно-научная конференция Военной академии Республики Беларусь (Минск, 2009); 5-я Международная молодёжная научно-техническая конференция «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций» (РТ-2009), (Севастополь, 2009); Международная научно-техническая конференция, посвященная 45-летию МРТИ–БГУИР (Минск, 2009); 18th International Conference on Microwave, Radar and Wireless Communications МIKON-2010 (Vilnius, 2010); 6-я Международная молодёжная научно-техническая конференция «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций» (РТ-2010), (Севастополь, 2010); 12-я Военно-научная конференция Военной академии Республики Беларусь (Минск, 2010); 7-я Международная молодёжная научно-техническая конференция «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций» (РТ-2011), (Севастополь, 2011); Республиканская научная конференция студентов и аспирантов вузов Республики Беларусь «НИРС–2011» (Минск, 2011); VIII International Conference on Antenna Theory and Techniques (Kyiv, 2011); The Sixth International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (Sevastopol, 2012); 8-я Международная молодёжная научно-техническая конференция «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций» (РТ-2012), (Севастополь, 2012).

Опубликованность результатов диссертации

По материалам диссертации опубликованы 23 научные работы, среди них 6 статей в научных рецензируемых журналах, общим объемом 3,5 авторских листа, 17 публикаций в виде статей и тезисов докладов в сборниках материалов международных и республиканских конференций.

Структура и объем диссертации

Во введении обосновывается актуальность научной работы, отражается место диссертации среди других работ в данной области.

В первой главе выполнен аналитический обзор литературы по теме плоских и конформных антенных решёток, по статистической теории антенн и влиянию выхода из строя излучателей. Выявлены вопросы, которые требуют дополнительного исследования, определены предмет и задачи диссертационных исследований. Во второй главе описана разработанная математическая модель антенной решётки обобщённой схемы построения. В третьей главе выполнено сравнение решёток с различными формами раскрыва в широком диапазоне изменения параметров амплитудного распределения. Исследована энергетическая эффективность различных по форме раскрывов. Проведен подробный статистический анализ плоских решёток. Рассмотрены вопросы влияния на параметры решёток выхода из строя излучающих элементов. В четвёртой главе рассмотрены различные явления в решётках с конформным сканированием, подробно изучено влияние ширины главного лепестка ДН элементарного излучателя на характеристики цилиндрической антенной решётки. Детально рассмотрены различные виды сканирования в многогранной антенной решётке. Выполнен статистический анализ цилиндрической и многогранной антенных решёток.

В заключении кратко изложена сущность полученных научных результатов и даны рекомендации по их практическому использованию.

В приложении А описано программное обеспечение разработанное на базе математической модели.

Диссертационная работа состоит из перечня сокращений, введения, общей характеристики работы, основной части из четырёх глав, заключения, библиографического списка и приложений. Полный объём работы составляет 142 страницы, из них 84 страниц основного текста, 162 рисунка на 36 страницах, 7 таблиц на 2 страницах, 3 приложения на 9 страницах, список используемых литературных источников из 95 наименований на 8 страницах, список публикаций автора из 23 наименований на 3 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Во *введении* обоснована актуальность научных исследований, проведенных в диссертации, показана необходимость более детального исследования плоских решёток со сложными формами раскрыва и решёток с конформным типом сканирования, отражено место диссертации среди других работ.

В *первой главе* дан исторический очерк развития дел в теории и технике плоских антенных решёток и решёток с конформным типом сканирования. Проведен обзор работ, посвящённых статистической теории антенн и выходу из строя излучающих элементов, на основании которого выделен ряд вопросов, требующих дополнительного исследования, сформулирована цель и задачи диссертационной работы.

Во *второй главе* описана математическая модель антенной решётки обобщённой схемы построения. В неё входят выражения для расчёта координат (x, y, z) , направляющих косинусов, амплитуд и фаз возбуждения (A, Ph) излучателей антенных решеток со сложными излучающими поверхностями.

Нормированная ДН элементарного излучателя с заданной шириной главного лепестка $(2\Theta_{0,5})$ задаётся выражением

$$rc(\Theta_{0,5}, \beta) = \sin(1,3917/\Theta_{0,5} \cdot \beta) / \beta, \quad (1)$$

где β – угол отклонения от направления максимального излучения.

В математическую модель входят выражения для расчёта ДН решетки. При расчёте учитываются случайные ошибки:

- Am – максимальная величина ошибки по амплитуде в процентах от амплитуды возбуждения излучателя;
- Fm – максимальная величина ошибки по фазе, в град;
- DX, DY, DZ – максимальные ошибки по координатам X, Y, Z , в мм.

В расчётах используется функция $rnd(\xi)$, где ξ – момент времени. Эта функция или подобные ей присутствуют во многих средах программирования. Она случайным образом генерирует число от 0 до 1 с равномерным статистическим законом распределения.

Координаты излучателя с учётом случайных ошибок находятся так:

$$x' = x + DX \cdot (2 \cdot rnd(\xi) - 1), \quad (2)$$

$$y' = y + DY \cdot (2 \cdot rnd(\xi) - 1), \quad (3)$$

$$z' = z + DZ \cdot (2 \cdot rnd(\xi) - 1). \quad (4)$$

Амплитуда возбуждения излучателя с учётом ошибки:

$$A' = A + Am/100 \cdot A \cdot (2 \cdot rnd(\xi) - 1), \quad (5)$$

где A – амплитуда возбуждения излучателя без ошибки.

Угол β выражается через направляющие косинусы излучателя и направления излучения, задаваемого сферическими координатами φ и θ :

$$\beta = \arccos(\cos X \cdot \cos X_{\varphi,\theta} + \cos Y \cdot \cos Y_{\varphi,\theta} + \cos Z \cdot \cos Z_{\varphi,\theta}). \quad (6)$$

Фаза возбуждения излучателя с учётом ошибки определяется так:

$$Ph' = Ph + Fm \cdot (2 \cdot rnd(\xi) - 1), \quad (7)$$

где Ph – фаза возбуждения излучателя без ошибки.

Выражения для мнимой и действительной частей комплексной ДН решетки:

$$\operatorname{Re} RP(\varphi, \theta) = \sum_{q=0}^{Q-1} rc(\Theta_{0,5}, \beta) \cdot D_{\max} \cdot A' \cdot \cos(Ph' + PhD); \quad (8)$$

$$\operatorname{Im} RP(\varphi, \theta) = \sum_{q=0}^{Q-1} rc(\Theta_{0,5}, \beta) \cdot D_{\max} \cdot A' \cdot \sin(Ph' + PhD), \quad (9)$$

где q – номер излучателя, Q – общее число излучателей в решетки, PhD – фазовое расстояние от излучателя до точки, в которой находится поле, D_{\max} – коэффициент направленного действия (КНД) элементарного излучателя.

Математическая модель проволочных антенн включает в себя описание процесса разбиения проводников антенны на M сегментов, вычисление декартовых координат начала и концов сегментов, вычисление направляющих косинусов сегментов. Внутренняя задача для проволочной антенны решается при помощи интегрального уравнения Поклинтгона. К этому уравнению применяется процесс Бубнова–Галёркина с использованием кусочно-постоянных базисных и весовых функций. В результате чего получается система линейных алгебраических уравнений:

$$\sum_{m=1}^M I_m K_{mn} = U_n, \quad (10)$$

где I_m – вектор искомого тока;

U_n – вектор, характеризующий стороннее электрическое поле;

m – номер сегмента, на котором расположена точка истока;

n – номер сегмента, на котором расположена точка наблюдения.

Далее приводятся выражения для расчёта коэффициентов матрицы K_{mn} :

$$K_{mn} = \text{Re} K_{mn} + i \cdot \text{Im} K_{mn}; \quad (11)$$

$$\text{Re} K_{mn} = \text{Re} A_{mn} + \text{Re} B_{mn}; \quad \text{Im} K_{mn} = \text{Im} A_{mn} + \text{Im} B_{mn}; \quad (12)$$

$$\text{Re} A_{mn} = 30k \int_{P1}^{P2} \int_{Q1}^{Q2} \frac{\cos R}{R} \cdot dp \cdot dq; \quad \text{Im} A_{mn} = -30k \int_{P1}^{P2} \int_{Q1}^{Q2} \frac{\sin R}{R} \cdot dp \cdot dq; \quad (13)$$

$$\text{Re} B_{mn} = -30k \left[\frac{\cos(kR_{22})}{R_{22}} - \frac{\cos(kR_{12})}{R_{12}} - \frac{\cos(kR_{21})}{R_{21}} + \frac{\cos(kR_{11})}{R_{11}} \right]; \quad (14)$$

$$\text{Im} B_{mn} = 30k \left[\frac{\sin(kR_{22})}{R_{22}} - \frac{\sin(kR_{12})}{R_{12}} - \frac{\sin(kR_{21})}{R_{21}} + \frac{\sin(kR_{11})}{R_{11}} \right]; \quad (15)$$

где i – мнимая единица, $P1, P2, Q1, Q2$ – точки в начале и конце m -го и n -го сегментов, k – волновое число свободного пространства, lp, lq – криволинейные координаты вдоль излучающего проводника, $R, R_{11}, R_{12}, R_{21}, R_{22}$ характеризуют расстояние между точками в сегменте истока и сегменте наблюдения.

Полученная система решается методом Гаусса. Таким образом, рассчитываются токи на проволочной антенне, а по ним определяется входное сопротивление излучателя с учетом взаимодействия в составе решетки, поле антенны в заданной точке пространства, коэффициент направленного действия, диаграмма направленности и ее параметры. При этом используется метод векторного потенциала. В соответствии с ним поле проволочной антенны определяется выражением:

$$\vec{E} \approx -i \frac{60\pi}{\lambda} \int_L \vec{I} \frac{e^{-ikR}}{R} dl, \quad (16)$$

где R – расстояние между точкой интегрирования на проводнике антенны и точкой наблюдения; \vec{I} – ток в проводниках антенны, определяемый из системы

(10). Выражение (16) определяет поле в области пространства, дальней для элементарного излучателя антенны \vec{dl} . Эта область расположена от элементарного излучателя примерно на расстоянии $R > \lambda$. Это значительно ближе границы дальней зоны в целом от всей антенны.

Третья глава посвящена исследованию плоских антенных решёток со сложными формами раскрыва: прямоугольной, восьмиугольной, эллиптической и т.п. (рисунки 1 – 4). Параметры таких решёток проанализированы в широком диапазоне изменения параметров амплитудного распределения. Среди исследуемых параметров следующие: F_{bm} – уровень максимального бокового лепестка, F_{bs} – среднеквадратичный уровень бокового излучения, D – коэффициент направленного действия, $2\theta_{0,5}$ – ширина главного лепестка. Характеристики различных по форме раскрывов сопоставлены между собой. Произведена оценка энергетической эффективности решёток с различными формами раскрыва. В качестве энергетического показателя использован параметр $K_e = P_s / P_{1max}$, где P_s – полная мощность излучения решётки, P_{1max} – максимальная мощность излучения одного приемопередающего модуля активной решётки. На рисунке 5 показана зависимость от числа излучателей в строке (W) энергетического показателя (K_e) – (рисунок 5, а) и коэффициента направленного действия (D) – (рисунок 5, б), для случая, когда в решётках с эллиптическим и восьмиугольным раскрывом амплитудное распределение равномерное. В решётке с прямоугольным раскрывом амплитудное распределение комбинированное, спадающее к краям по закону косинуса в степени $P = 1$ до уровня подставки Δ . Параметр Δ в зависимости от числа излучателей в строке W менялся от 0,7 до 0,58. Это обеспечивало равенство уровня максимального бокового лепестка F_{bm} в решётках с разной формой раскрыва. Обозначение кривых на рисунках: 1 – эллиптический раскрыв, 2 – прямоугольный раскрыв, 3 – восьмиугольный раскрыв.

Далее в третьей главе исследовано влияние ошибок расположения излучателей на характеристики плоских решёток с различными формами раскрыва. Проанализированы ошибки, расположенные в плоскости решётки и в направлении, перпендикулярном расположению плоскости решётки.

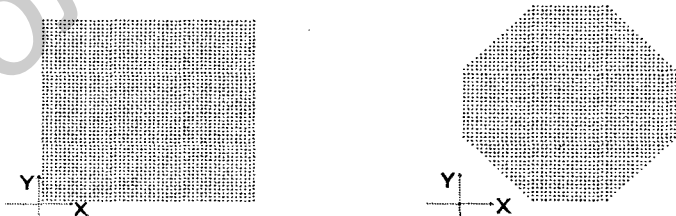


Рисунок 1 – Прямоугольная решётка Рисунок 2 – Восьмиугольная решётка

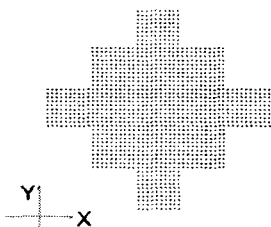
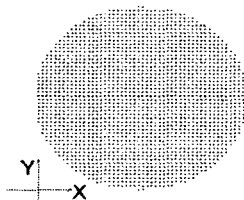


Рисунок 3 – Эллиптическая решётка Рисунок 4 – Многомодульная решётка

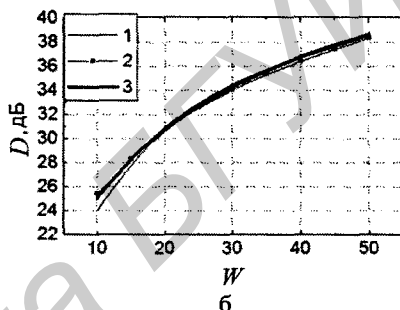
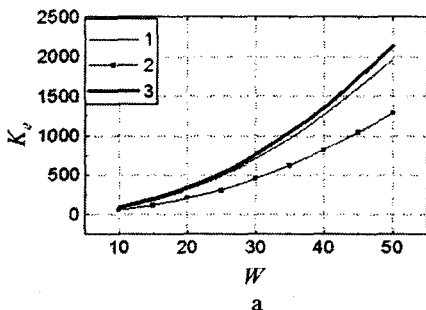


Рисунок 5 – Зависимость параметров решётки от числа излучателей в строке и формы раскрыва

Исследованы различия во влиянии на ДН таких разновидностей ошибок возбуждения, как быстрые и медленные, внутриканальные и межканальные, имеющие место в активных решетках. Проанализировано влияние случайных ошибок возбуждения на параметры решёток с различными формами раскрыва. Сделано заключение, что все параметры таких решёток в одинаковой степени чувствительны к ошибкам возбуждения, за исключением среднеквадратичного отклонения главного максимума $d\theta$, которое в эллиптической и восьмиугольной решётках больше, чем в прямоугольной (рисунок 6). Обозначение кривых на рисунке 6: 1 – прямоугольный раскрыв, 2 – эллиптический раскрыв, 3 – восьмиугольный раскрыв.

Исследовано влияние параметров амплитудного распределения на чувствительность плоских антенных решёток к случайным ошибкам возбуждения. Показано, что чувствительность максимального и среднеквадратичного уровня боковых лепестков (УБЛ) сильно зависит от параметров амплитудного распределения в отличие от чувствительности КНД.

Далее в рассматриваемой главе произведен анализ влияния выхода из строя излучателей на характеристики плоских решёток. Сравнены различные формы раскрывов по чувствительности параметров к отказу элементов. Изучен выход из строя модулей в многомодульной прямоугольной решётке. Рассмот-

рены отказы различного типа: обнуление амплитуды, скачок фазы на 180° . Исследовано влияние взаимодействия между излучателями на характеристики решётки с отказавшими элементами. Показано, что используемый тип излучателя не влияет на чувствительность параметров решётки к отказу элементов и к случайным ошибкам.

Четвёртая глава посвящена изучению решёток с конформным типом сканирования. В первом разделе главы исследовано влияние ширины главного лепестка ДН элементарного излучателя $2\theta_{0,5l}$ на характеристики цилиндрической и многогранной антенных решёток. Показано, что зависимость максимального уровня боковых лепестков в ЦАР от $2\theta_{0,5l}$ имеет глубокий минимум (рисунок 7). Расположение и глубина этого минимума зависит от геометрических параметров решётки и параметров амплитудного распределения. Такой характер зависимости позволяет за счёт выбора оптимальной ширины главного лепестка ДН излучателя увеличить коэффициент направленного действия ЦАР на 2 – 3 дБ или понизить максимальный боковой лепесток на 6 – 10 дБ. На рисунках 8 и 9 приведены изображения ЦАР и МАР.

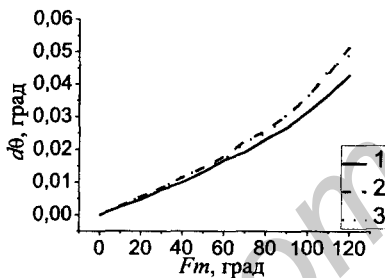


Рисунок 6 – Зависимость $d\theta$ от ошибки возбуждения по фазе

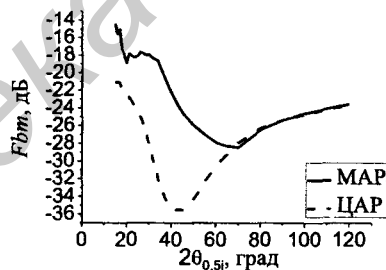


Рисунок 7 – Зависимость F_{bm} от ширины ДН элементарного излучателя

Во втором разделе четвёртой главы подробно изучено конформное и фазовое сканирование в МАР. В четвёртой главе произведено также сравнение чувствительности многогранной, цилиндрической и плоской антенных решёток при воздействии на них таких негативных факторов, как случайные ошибки расположения и возбуждения излучателей, а также выход излучателей из строя. Показано, что параметры цилиндрической и многогранной решёток при воздействии негативных факторов одинаковы.



Рисунок 8 – Вид ЦАР

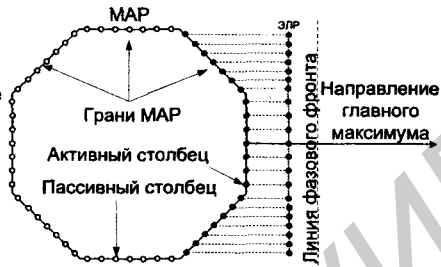


Рисунок 9 – Вид МАР

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. В процессе работы над диссертацией с использованием теоремы перемножения диаграмм направленности, интегрального уравнения для тока в тонких проводниках и метода векторного потенциала разработана математическая модель антенной решётки обобщенной схемы построения, позволяющая:

- численно анализировать линейные и плоские антенные решётки с различной формой раскрытия [5], кольцевые, цилиндрические, конические, пирамидальные, многоугольные и многогранные антенные решётки [1, 2, 4];
- анализировать антенные решётки указанных типов из вибраторных, рамочных излучателей с учётом взаимодействия в составе решётки [5];
- анализировать решётки, состоящие из излучателей с заданной шириной главного лепестка диаграммы направленности [23];
- учитывать случайные ошибки возбуждения излучателей по амплитуде и фазе, положению в пространстве по трём ортогональным координатам [6];
- учитывать вышедшие из строя излучатели [3];

Программная реализация разработанной модели отличается от известных, обычно применяемых коммерческих программ CST Microwave Studio, HFSS, FEKO тем, что требует для решения задачи анализа меньше времени в 10 – 1000 раз (выигрыш зависит от числа излучателей в решётке) и меньше оперативной памяти компьютера в несколько раз, а также позволяет рассчитывать решётки сложных форм и больших волновых размеров.

2. При сравнении эллиптической и восьмиугольной решёток между собой установлено, что восьмиугольная решётка имеет преимущество по значению максимального УБЛ (1 – 2 дБ), зато у эллиптической решётки уже главный лепесток (на 2 %) и соответственно более высокий КНД (на 0,1 – 0,2 дБ) [5].

3. Показано, что в зависимости от параметров амплитудного распределения энергетическая эффективность антенных решёток с эллиптической и восьмиугольной формами раскрыва на 20 – 40 % превышает эффективность антенной решётки с прямоугольной формой раскрыва [5, 18, 20]. Помимо этого, прямоугольная антенная решётка имеет на 20 % излучателей больше, чем эллиптическая и восьмиугольная, при обеспечении одинакового качества параметров ДН.

4. Показано, что быстрые и медленные ошибки возбуждения излучателей различным образом влияют на отдельную реализацию ДН. При усреднении множества реализаций их влияние практически одинаково [6]. Влияние внутриканальных и межканальных ошибок на среднюю ДН также практически одинаковое [6, 10, 21].

5. Установлено, что различные типы случайных ошибок в одинаковой степени влияют на параметры плоских решёток со всеми формами раскрывов [6, 19]. Так, к уменьшению КНД на 1 дБ может привести ошибка по амплитуде $Am = 90\%$ или ошибка по фазе $Fm = 50^\circ$. Исключение составляет среднеквадратичное отклонение главного максимума, которое в эллиптической и восьмиугольной решётке на 15 % больше, чем в прямоугольной решётке.

6. Для плоских решёток с различными формами раскрыва установлено, что увеличение уровня бокового излучения при воздействии случайных ошибок значительно зависит от величины подставки в амплитудном распределении. Так, в плоской решётке при наличии фазовой ошибки в $Fm = 80^\circ$ в зависимости от величины подставки в амплитудном распределении увеличение максимального УБЛ может варьироваться от 1 до 15 дБ. Величина уменьшения КНД при воздействии случайных ошибок практически не зависит от величины подставки [6].

7. Показано, что изменение фазы в излучателях на 180° сильнее влияет на уровень боковых лепестков, чем обнуление амплитуды в этих же облучателях. Для прямоугольной решетки, в которой из строя вышло 20 % элементов, разница во влиянии составляет 5 – 7 дБ [3].

8. Для прямоугольной многомодульной решётки характер расположения боковых лепестков зависит от расположения вышедших из строя модулей и значительно отличается от характера расположения боковых лепестков при неисправностях в случайно расположенных излучателях. Этот факт может быть использован при диагностике неисправных элементов. В прямоугольной решётке отказ 20 % случайно расположенных по раскрыву излучателей практически не ухудшает максимальный УБЛ, а отказ такого же количества излучателей в составе модулей приводит к росту максимального УБЛ на 5 дБ [3, 18].

9. Зависимость максимального и среднеквадратичного УБЛ в ЦАР от ширины главного лепестка ДН элементарного излучателя имеет ярко выраженный ми-

нимум, величина которого в зависимости от геометрии ЦАР и параметров амплитудного распределения составляет 6 – 14 дБ. Такой характер зависимости позволяет достигать низких значений УБЛ в ЦАР за счёт использования подходящей ширины главного лепестка ДН излучателя. За счёт правильного её выбора, а также соответствующего подбора параметров амплитудного распределения в ЦАР можно значительно уменьшить уровень бокового излучения (на 6 – 10 дБ) или же повысить КНД (на 2 – 3 дБ) [1, 23].

10. Использование конформного сканирования в многогранных антенных решётках с точки зрения электрических характеристик является наиболее оптимальным [1]. Для улучшения электрических параметров в процессе сканирования необходимо увеличивать количество граней в МАР и ширину ДН элементарного излучателя. При достаточном количестве граней N конформное сканирование в МАР практически не искажает характеристики ДН, так при $N=16$ колебания КНД составляют 0,1 дБ, а колебания максимального УБЛ не превышают 1 дБ. При наличии технических трудностей реализации конформного сканирования в МАР допускается реализация коммутационно-фазового сканирования [14, 15].

11. Получены зависимости параметров цилиндрической и многогранной антенных решёток от величин случайных ошибок возбуждения, положения излучателей и выхода из строя излучающих элементов. Установлено, что многогранная антенная решётка и цилиндрическая антенная решётка обладают одинаковой чувствительностью ко всем видам случайных ошибок [2, 4]. Показано, что многогранная антенная решётка по своим электрическим параметрам не уступает цилиндрической антенной решётке [22].

Рекомендации по практическому использованию результатов

При проектировании плоской антенной решётки с низким уровнем бокового излучения рекомендуется обратить внимание на эллиптическую и восьмиугольную формы раскрывов. Решётки с такими формами раскрыва обладают лучшей энергетической эффективностью, чем решётка с прямоугольной формой раскрыва, и требуют меньшего количества излучателей при обеспечении одинакового качества параметров ДН. Недостатком таких решёток является то, что при наличии случайных фазовых ошибок или ошибок положения излучателей среднеквадратичное отклонение главного максимума в них несколько больше, чем в решётке с прямоугольной формой раскрыва.

При выборе параметров амплитудного распределения в антенной решётке необходимо иметь в виду то, что существует некоторый оптимальный уровень подставки, при котором влияние случайных ошибок на уровень боковых лепестков не сказывается слишком сильно.

При реализации приёмопередающих модулей для антенных решёток особое внимание необходимо уделить элементам, которые влияют на определения фазы принимаемого сигнала, т.к. ошибки в определении фазы и неисправности типа «скачок фазы» наиболее сильно сказываются на параметрах решётки.

В многомодульной антенной решётке по структуре расположения боковых лепестков возможна диагностика неисправных модулей.

Параметры плоских антенных решёток с вышедшими из строя элементами можно рассчитывать, не учитывая взаимодействия между излучателями. Таким образом, можно сэкономить время, затрачиваемое на моделирование, а точность расчётов ухудшится не более чем на 1 – 3 %.

При проектировании цилиндрической антенной решётки необходимо уделить внимание выбору ширины ДН элементарного излучателя. За счёт правильного её выбора, а также соответствующего подбора параметров амплитудного распределения можно значительно уменьшить уровень бокового излучения (на 6 – 10 дБ) или же повысить КНД (на 2 – 3 дБ). Изучение влияния ДН элементарного излучателя на электрические параметры ЦАР может быть продолжено. Интересен вопрос о том, каким образом фазовая ДН элементарного излучателя повлияет на характеристики ЦАР.

При выборе типа сканирования в многогранных антенных решётках в первую очередь рекомендуется обратить внимание на конформное сканирование. При достаточном количестве граней такое сканирование практически не искажает электрические характеристики антенной системы. Если параметры ДН при сканировании не удовлетворяют требуемым значениям, то рекомендуется увеличить количество граней в решётке или ширину ДН элементарного излучателя. Если различные технические причины не позволяют реализовать конформное сканирование, то в МАР возможна реализация коммутационно-фазового сканирования, которое также обеспечивает высокое качество характеристик антенной системы.

Статистическое исследование характеристик ЦАР и МАР показало, что эти два типа решёток имеют одинаковую чувствительность к случайным ошибкам, а так как конформное сканирование в МАР осуществляется практически без искажений, то разработчикам антенных систем кругового обзора рекомендуется реализовывать систему на базе МАР. Такая реализация с точки зрения характеристик излучения ничем не уступает ЦАР, но значительно проще с точки зрения конструкции.

Графики и таблицы, расположенные в третьей и четвёртой главе, отражают статистические характеристики плоских и конформных решёток при различных величинах случайных ошибок. Эти результаты могут использоваться как справочные материалы для прогнозирования ухудшения электрических параметров в антенных решётках вследствие воздействия случайных ошибок.

Разработанную математическую модель и реализующую её программу целесообразно использовать при проектировании антенных решёток со сложными излучающими поверхностями с учётом различных негативных факторов, что существенно облегчит и удешевит проектирование антенной решётки.

Результаты проведенных исследований были использованы на предприятии ОАО «КБ Радар» – управляющей компании холдинга «Системы радиолокации» :

1) при разработке алгоритмов управления фазированной антенной решётки (ФАР) опытного образца изделия «Роса-РБ»;

2) при выполнении научно-исследовательской работы «Разработка методов и технологий создания аналоговых компонентов твердотельной АФАР для радиолокационного модуля, размещаемого на мобильных носителях, в части разработки системы автоматизированного проектирования (САПР) АФАР» шифр «Траектория 3.1.3» по программе Союзного государства.

Программа численного моделирования решеток со сложной формой излучающей поверхности разработана в соответствии с техническим (научным) заданием на выполнение научно-исследовательских работ по теме: «Разработка методов проектирования фазированных антенных решеток с изготовлением макета фрагмента антенной решётки» – ГБЦ № 11-3080 в НИЛ 1.6 БГУИР. Результаты моделирования использовались при выполнении фрагмента антенной микрополосковой решётки и при подготовке аннотированных и итогового отчётов в рамках указанной темы в 2011, 2012 и 2013 годах.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

Статьи в научных рецензируемых журналах

1. Москалёв, Д.В. Параметры кольцевой и многоугольной антенных решёток при конформном и фазовом сканированиях / Д.В. Москалёв // Доклады БГУИР. – 2011. – № 2 (56). – С. 16–21.

2. Москалёв, Д.В. Влияние выхода из строя излучающих элементов на характеристики многогранной антенной решётки / Д.В. Москалёв // Доклады БГУИР. – 2011. – № 7 (61). – С. 68–75.

3. Юрцев, О.А. Влияние выхода из строя излучающих элементов на характеристики плоской антенной решётки / О.А. Юрцев, Д.В. Москалёв, В.В. Кизименко // Доклады БГУИР. – 2011. – № 8 (62). – С. 45–51.

4. Москалёв, Д.В. Влияние случайных ошибок возбуждения и положения излучателей на характеристики многогранной антенной решётки / Д.В. Москалёв // Доклады БГУИР. – 2012. – № 1 (63). – С. 47–53.

5. Сравнительный анализ плоских антенных решёток с разной формой раскрыва по энергетическому показателю / О.А. Юрцев, А.П. Юбка, Д.В. Москалёв, Н.М. Наумович // Доклады БГУИР. – 2012. – № 2 (64). – С. 39–45.

6. Юрцев, О.А. Влияние случайных ошибок возбуждения и положения излучателей на характеристики плоской антенной решётки / О.А. Юрцев, Д.В. Москалёв // Наука и военная безопасность. – 2012. – № 2 (34). – С. 32–38.

Статьи в сборниках материалов конференций

7. Москалёв, Д.В. Линейная микрополосковая антенная решётка с диаграммой направленности типа «косеканс» / Д.В. Москалёв, О.А. Юрцев // 3-й Международный радиоэлектронный форум «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития» МРФ-2008: сб. науч. тр. – Т. I. Международная конференция «Современные и перспективные системы радиолокации, радиоастрономии и спутниковой навигации». Ч. 2 / АНПРЭ, ХНУРЭ. – Харьков, 2008. – С. 125–128.

8. Comparative numerical analysis of the slot antenna arrays the energy and finite element methods / N. Naumovich, O. Yurtsev, D. Moskaliyov, V. Kizimenko, A. Joubko // 18th International Conference on Microwave, Radar and Wireless Communications MIKON-2010, June 14–16, Vilnius, Lithuania. – Vilnius, 2010. – P. 170–172.

9. Kizimenko, V. The Effect of Defective Radiators and Modules on Characteristics of Array Antenna with Complex Aperture and Multi-Faceted Array Antenna / V. Kizimenko, D. Moskaliyov, N. Naumovich, A. Yubko and O. Yurtsev // Proc. of VIII Int. Conf. on Antenna Theory and Techniques, 20–23 Sept., 2011. – Kyiv, Ukraine. – P. 126–128.

10. The Influence of Interchannel and Intrachannel Nonidentities on Antenna Array Characteristics / V. Kizimenko, D. Moskaliyov, N. Naumovich, O. Yurtsev // Proceedings of VIII International Conference on Antenna Theory and Techniques, 20–23 Sept., 2011, Kyiv, Ukraine. – Kyiv, 2011. – P. 129–131.

Тезисы докладов на научных конференциях

11. Москалёв, Д.В. Моделирование линейной микрополосковой антенной решётки с диаграммой направленности типа «косеканс» / Д.В. Москалёв, О.А. Юрцев, В.В. Кизименко // Международная научно-техническая конференция, посвященная 45-летию МРТИ-БГУИР, Минск, 19 марта 2009 : тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф. / БГУИР. – Минск, 2009 – С. 99.

12. Кизименко, В.В. Численное моделирование плоской многоэлементной антенной решётки полосковых излучателей / В.В. Ки-зименко, О.А. Юрцев, Д.В. Москалев // Международная научно-техническая конференция, посвященная 45-летию МРТИ-БГУИР, Минск, 19 марта 2009 : тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф. / БГУИР. – Минск, 2009. – С. 138.

13. Кизименко, В.В. Приближенный численный анализ полоскового излучателя в составе антенной решётки / В.В. Кизименко, Д.В. Москалёв // 10-я Военно-научная конференция Военной академии Республики Беларусь, 9–10 апр. 2009 г.: тез. докл. / ВА Респ. Беларусь. – Минск, 2009. – С. 330.

14. Москалёв, Д.В. Сравнительный анализ параметров фазового сканирования в кольцевой и линейной антенных решётках / Д.В. Москалёв, В.В. Кизименко // 10-я Военно-научная конференция Военной академии Республики Беларусь, 9 – 10 апр. 2009 г.: тез. докл. – Минск, 2009. – С. 330.

15. Москалев, Д.В. Особенности характеристик цилиндрических антенных решёток при конформном и фазовом сканировании / Д.В. Москалев, В.В. Кизименко // Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций (РТ-2009): материалы 5-й Междунар. молодёж. научн.-техн. конф., Севастополь, 20–25 апр. 2009 г. / Севаст. нац. техн. ун-т. –Севастополь, 2009. – С. 154.

16. Кизименко, В.В. Сравнительный анализ полосковых излучателей электродинамическими методами и эксперимент / В.В. Кизименко, Д.В. Москалев // Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций

(РТ-2009): материалы 5-й Междунар. молодёж. науч.-техн. конф., Севастополь, 20–25 апр. 2009 г. / Севаст. нац. техн. ун-т. – Севастополь, 2009. – С. 155.

17. Юбко, А.П. Сравнительный анализ характеристик щелевых антенных решёток энергетическим методом и методом конечных элементов / А.П. Юбко, В.В. Кизименко, Д.В. Москалёв // Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций (РТ-2010): материалы 6-й Междунар. молодёж. науч.-техн. конф., Севастополь, 19–24 апреля 2010 г. / Севаст. нац. техн. ун-т. – Севастополь, 2010. – С. 214.

18. Москалев, Д.В. Влияние выхода из строя элементов на характеристики плоской антенной решётки с модульным построением / Д.В. Москалев, В.В. Кизименко // Сучасні проблеми радіотехніки та телекомунікацій «РТ-2011»: матеріали 7-ї міжнар. молодіж. наук.-техн. конф., Севастополь, 11–15 квітня 2011 р. / СевНТУ. – Севастополь, 2011. – С. 242.

19. Москалев, Д.В. Влияние случайных ошибок положения излучателей на характеристики плоской антенной решётки / Д.В. Москалев, В.В. Кизименко, А.П. Юбко // Сучасні проблеми радіотехніки та телекомунікацій «РТ - 2011»: Матеріали 7-ї міжнар. молодіж. наук.-техн. конф., Севастополь, 11–15 квітня 2011 р. / СевНТУ. – Севастополь, 2011. – С. 243.

20. Юбко, А.П. Зависимость коэффициента эффективности плоской антенной решётки от формы раскрыва и амплитудного распределения возбуждения / А.П. Юбко, Д.В. Москалев // Сучасні проблеми радіотехніки та телекомунікацій «РТ-2011»: Матеріали 7-ї міжнар. молодіж. наук.-техн. конф., Севастополь, 11–15 квітня 2011 р. / СевНТУ. – Севастополь, 2011. – С. 245.

21. Москалев, Д.В. Влияние межканальных и внутриканальных неидентичностей в активной цифровой модульной антенной решётке на ее характеристики / Д.В. Москалёв, В.В. Кизименко, О.А. Юрцев // НИРС–2011: сб. тез. докл. Респ. науч. конф. студ. и асп. вузов Респ. Беларусь (18 окт. 2011). – Минск, 2011. – С. 263.

22. Москалёв, Д.В. Сравнение цилиндрической и многогранной антенных решёток / Д.В. Москалёв // Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций: материалы 8-й междунар. молодёж. науч.-техн. конф., Севастополь, 23–27 апр. 2012 г. – Севастополь, 2012. – С. 202.

23. Maskaliou, D.V. Effect of width of elementary radiator radiation pattern to cylindrical antenna array performance / D.V. Maskaliou // Ultrawideband and Ultra-short Impulse Signals, Sevastopol, Ukraine, Sept. 17 – 21: book of abstracts. – Sevastopol, 2012. – P. 45.

Москалев

РЭЗІЮМЭ

Маскалёў Дзмітрый Віктаравіч

Антэнныя рашоткі са складанымі выпраменьвальнымі паверхнямі

Ключавыя словы: эліптычная антэнная рашотка, васьмівугольная антэнная рашотка, цыліндрычная антэнная рашотка, шматгранная антэнная рашотка, памылкі ўзбуджэння выпраменьвальнікаў, памылкі размяшчэння выпраменьвальнікаў, выхад з ладу выпраменьвальнікаў, энергетычная эфектыўнасць, канформнае сканаванне, фазовае сканаванне.

Мэта работы: распрацоўка матэматычнай мадэлі антэннай рашоткі абагульненай схемы пабудовы, якая дазваляе лікава мадэляваць антэнныя рашоткі з рознай формай раскрыву, рознай формай паверхні размяшчэння выпраменьвальнікаў, з рознымі тыпамі выпраменьвальнікаў, якая ўлічвае ўплыў розных нестабільнасцяў на характарыстыкі рашоткі. Выяўленне заканамернасцей ва ўплыве на параметры плоскіх антэнных рашотак са складанай формай раскрыву і антэнных рашотак з канформным тыпам сканавання выпадковых памылак ўзбуджэння выпраменьвальнікаў па фазе і амплітудзе, памылак размяшчэння выпраменьвальнікаў і выхаду выпраменьвальнікаў з ладу, геаметрычных параметраў элементаў рашотак і тыпаў выпраменьвальнікаў.

Метады даследавання: лікавы эксперымент на праграмным забеспячэнні, у аснове якога ляжыць распрацаваная матэматычная мадэль.

Атрыманыя вынікі і іх назіраныя. У лікавых эксперыментах падрабязна даследаваўся ўплыў формы раскрыву на параметры плоскай антэннай рашоткі. Прааналізаваны параметры рашотак з рознымі раскрывамі пры наяўнасці выпадковых памылак у размяшчэнні і ўзбуджэнні выпраменьвальнікаў. Разлічана энергетычная эфектыўнасць такіх рашотак. Даследаваны выхад з ладу модуляў у шматмодульнай прамавугольнай рашотцы. Разгледжаны выходы з ладу выпраменьвальнікаў рознага тыпу: абнуленне амплітуды, скачок фазы на 180° . Даследаван уплыў узаемадзеяння паміж выпраменьвальнікамі на характарыстыкі рашоткі з элементамі, якія выйшлі з ладу. Падрабязна разгледжаны рашоткі з канформным тыпам сканавання. Даследавана пытанне аптымізацыі параметраў цыліндрычнай антэннай рашоткі за кошт выбару шырыні галоўнага пялёстка ДС элементарнага выпраменьвальніка. Зроблена параўнанне канформнага і фазовага сканавання ў шматграннай антэннай рашотцы. Зроблены статыстычны аналіз рашотак з канформным тыпам сканавання.

Вобласць прымянення. Атрыманыя вынікі могуць быць ужытыя пры праектаванні і прагназаванні параметраў шырокага класа антэнных рашотак.

РЕЗЮМЕ

Москалёв Дмитрий Викторович

Антенные решётки со сложными излучающими поверхностями

Ключевые слова: эллиптическая антенная решётка, восьмиугольная антенная решётка, цилиндрическая антенная решётка, многогранная антенная решётка, ошибки возбуждения излучателей, ошибки расположения излучателей, выход из строя излучателей, энергетическая эффективность, конформное сканирование, фазовое сканирование.

Цель работы: разработка математической модели антенной решётки обобщенной схемы построения, позволяющей численно моделировать антенные решётки с разной формой раскрыва, разной формой поверхности расположения излучателей, с разными типами излучателей, учитывающей влияние различных нестабильностей на характеристики решётки. Выявление закономерностей во влиянии на параметры плоских антенных решёток со сложной формой раскрыва и антенных решёток с конформным типом сканирования случайных ошибок возбуждения излучателей по фазе и амплитуде, ошибок расположения излучателей и выхода излучателей из строя, геометрических параметров элементов решёток и типов излучателей.

Методы исследования: численный эксперимент на программном обеспечении, в основе которого лежит разработанная математическая модель.

Полученные результаты и их новизна. В численных экспериментах подробно исследовалось влияние формы раскрыва на параметры плоской антенной решётки. Проанализированы параметры решёток с разными раскрывами при наличии случайных ошибок в положении и возбуждении излучателей. Рассчитана энергетическая эффективность таких решёток. Исследован выход из строя модулей в многомодульной прямоугольной решётке. Рассмотрены отказы излучателей различного типа: обнуление амплитуды, скачок фазы на 180° . Исследовано влияние взаимодействия между излучателями на характеристики решётки с отказавшими элементами. Подробно рассмотрены решётки с конформным типом сканирования. Изучен вопрос оптимизации параметров цилиндрической антенной решётки за счёт выбора ширины главного лепестка ДН элементарного излучателя. Выполнено сравнение конформного и фазового сканирований в многогранной антенной решётке. Проведён статистический анализ решёток с конформным типом сканирования.

Область применения. Полученные результаты могут быть применены при проектировании и прогнозировании параметров широкого класса антенных решёток.

SUMMARY

Maskaliou Dzmitry Viktaravich Antenna arrays with complex radiating surfaces

Keywords: elliptic antenna array, octagonal antenna array, cylindrical antenna array, multi-faceted antenna array, radiators excitation errors, radiators position errors, failure of radiators, energy efficiency, conformal scanning, phase scanning.

Objective of the research: To develop a mathematical model of the antenna array of the generalized scheme of construction that allows to simulate numerically arrays with different aperture shape, a different form of the radiators arrangement surface, with different types of radiators, which takes into account the effect of different instabilities on the characteristics of the array. To identify the regularities in the influence on the parameters of planar antenna arrays with complex shapes and aperture arrays with conformal type of scanning such factors as: random errors of the radiators excitation in phase and amplitude, errors of radiators position, radiators failure, the geometric parameters of elements of arrays and types of radiators.

Methods of investigation: Numerical experiment using the software which is based on the developed mathematical model.

The results obtained and their novelty. The numerical experiments investigated in detail the influence of aperture shape on the parameters of a plane antenna array. The parameters of the arrays with different shapes of aperture were analyzed when random errors in the position and excitation of radiators were present. The energy efficiency of such arrays was calculated. The failure of the modules in a multi-module array was investigated. Radiators failures of various types were considered such as zero amplitude, and phase jump by 180° . The influence of the interaction between the radiators on the characteristics of the array with failed elements was researched. The arrays with conformal type of scan were studied in detail. The optimization of parameters of the cylindrical antenna array by selecting the width of the main lobe elementary radiator was studied. Conformal and phase scans in a multi-faceted antenna array were compared. The statistical analysis of arrays with conformal type of scan was fulfilled.

Recommendations for application. The results can be applied in the design and prediction of parameters of a broad class of antenna arrays.

Научное издание

Москалёв Дмитрий Викторович

**АНТЕННЫЕ РЕШЁТКИ СО СЛОЖНЫМИ
ИЗЛУЧАЮЩИМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ**

Специальность 05.12.07 – Антенны, СВЧ-устройства и их технологии

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 30.10.2013.	Формат 60x84 1/16.	Бумага офсетная.
Гарнитура «Таймс».	Отпечатано на ризографе.	Усл. печ. л. 1,63.
Уч.-изд. л. 1,4.	Тираж 60 экз.	Заказ 416.

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»
ЛИ №02330/0494371 от 16.03.2009. ЛП №02330/0494175 от 03.04.2009
220013, Минск, П. Бровка, 6