

УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ»

УДК 621.396.67

ЛИХАЧЕВСКИЙ
Дмитрий Викторович

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АНТЕНН С СЕКТОРНОЙ И
ТОРОИДАЛЬНОЙ ДИАГРАММАМИ НАПРАВЛЕННОСТИ**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности 05.12.07 «Антенны, СВЧ устройства и их технологии»

Минск, 2008

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:

Гейстер Сергей Романович, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник ГУ «НИИ Вооруженных Сил Республики Беларусь»

Гусинский Александр Владимирович, кандидат технических наук, доцент, и.о. зав. НИЛ 1.9 НИЧ учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Оппонирующая организация:

Научно-производственное республиканское
унитарное предприятие «КБ Радар»

Защита состоится 12 июня 2008 года в 16⁰⁰ 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, корпус 1, ауд. 232, тел. 293-89-89, dissovet@bsuir.by

КРАТКОЕ ВВЕДЕНИЕ

В Республике Беларусь в последнее время происходит бурный рост в области разработки беспроводных систем передачи данных, радиолокационных систем и их внедрения в жизнь. Антенны для таких систем в большинстве случаев поступают из-за рубежа. Создание собственного производства позволит заменить импортную продукцию отечественной. Вопросы проектирования антенн требуют разработки математических моделей антенн для таких систем и соответствующего программного обеспечения. Этим вопросам посвящена диссертация.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными проектами и темами

Работа связана со следующими государственными программами:

1. ГНПП «Информационные технологии», задание 2-05 «Разработать и внедрить конструкцию антенн радиочастотных идентификационных меток для рабочих частот 860-960 МГц и 2,45 ГГц».
2. ОКР «Навес-У» – Научно-производственное республиканское унитарное предприятие «КБ Радар».

Цель и задачи исследования

Цель исследований:

1. Разработать математические модели и программное обеспечение для численного моделирования антенных решеток и зеркальных антенн с секторной и тороидальной диаграммами направленности (ДН).

2. Путем численного моделирования исследовать закономерности в антенных решетках, зеркальных и других антеннах с секторной и тороидальной ДН для использования при проектировании.

Для достижения поставленных целей необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать метод численного моделирования многоэлементных антенных решеток с использованием интегральных уравнений (ИУ) в тонкопроволочном приближении, снимающий ограничение на волновые размеры решетки, и использовать его для моделирования антенных решеток вибраторных и рамочных излучателей с секторной и тороидальной ДН.

2. Провести численное моделирование вибраторных и рамочных излучателей, решеток из таких излучателей, исследовать основные закономерности с целью получения информации, необходимой для проектирования антенн.

3. Разработать математическую модель зеркальной антенны обобщенной конструкции и исследовать основные закономерности распределения поля в заданной области пространства и зависимости электрических параметров от геометрических параметров антенны с целью получения информации, необходимой для проектирования многолучевых и сканирующих зеркальных антенн.

4. Разработать новые варианты построения антенн с секторной и тороидальной ДН.

Положения, выносимые на защиту

1. Метод анализа антенных решеток проволочных излучателей с использованием ИУ для тока, позволяющий рассчитывать характеристики излучения без ограничения на волновые размеры решетки.

2. Математическая модель многоэлементной антенной решетки директорных и рамочных излучателей, основанная на методе ИУ, снимающая ограничение на число излучателей в решетке.

3. Математическая модель зеркальной антенны обобщенной конструкции, основанная на методе физической оптики, позволяющая анализировать поле антенны в любой зоне пространства – ближней, промежуточной и дальней при сканировании и фокусировке антенны на заданное расстояние.

4. Новые варианты построения антенн с секторной ДН и изотропной ДН в горизонтальной плоскости, отличающиеся расширенным диапазоном частот и простотой конструкции.

5. Новые закономерности в зависимости характеристик поля излучения антенных решеток и зеркальных антенн от геометрических параметров антенн и зоны наблюдения:

– колебательный характер распределения амплитуды поля в ближней зоне вдоль оси антенной решетки и зеркальной антенны при больших волновых размерах апертуры антенн;

– зависимость пятна фокусировки в картинной плоскости от волновых размеров раскрыва зеркальной антенны и от расстояния до плоскости фокусировки;

– зависимость параметров ДН зеркальной антенны, сфокусированной в ближнюю зону, при сканировании.

Личный вклад соискателя

1. Предложен метод численного моделирования многоэлементных антенных решеток в режиме излучения, основанный на фрагментации решетки.

2. Разработаны математические модели рамочных, вибраторных антенн и многоэлементных антенных решеток из таких антенн в режиме излучения.

3. Разработана математическая модель зеркальной антенны обобщенной конструкции.

4. Проведено численное моделирование рамочных, вибраторных антенн и многоэлементных антенных решеток из таких антенн, зеркальной антенны. Сделаны выводы о закономерностях в зависимости электрических характеристик и параметров от геометрии антенн, частоты и в распределении поля в ближней зоне.

Вклад научного руководителя заключался в постановке общей задачи диссертации, частных задач, помощи в разработке математических моделей, разработке программного обеспечения, формулировке выводов по результатам численного моделирования.

Вклад соавторов опубликованных научных работ состоял в помощи при разработке программного обеспечения.

Апробация результатов диссертации

Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на 7 международных и 1 республиканской (РФ) научно-технических конференциях: X международная НТК «Современные средства связи» - 26.09.2005-30.09.2005, п. Нарочь, РБ; Международная НТК студентов, аспирантов и ученых «Молодежь и современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций «РТ-2006» - 17-21 апреля 2006 г., «РТ-2007» - 16-21 апреля 2007 г., Севастополь, Украина; IV Международная НТК «Проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств» - 25-26 мая 2006 г., г. Новополюцк, РБ; V Международная НТК «Физика и технические приложения волновых процессов» - 11-17 сентября 2006 г., г. Самара, РФ; 7-я Всероссийская научно-техническая конференция молодых ученых и студентов «Современные проблемы радиоэлектроники» 4-5 мая 2007 г., г. Красноярск, РФ; VI Международная НТК «Физика и технические приложения волновых процессов» - 11-17 сентября 2007 г., г. Самара, РФ; 6th International conference of Antenna Theory and Techniques – 17-21 September 2007, Sevastopol, Ukraine.

Опубликованность результатов диссертации

Результаты диссертации опубликованы в 19 печатных работах общим объемом 2,53 печатных листа, в том числе 4 статьи в научно-технических журналах объемом 1,1 печатных листа, 3 статьи и тезисы 12 докладов в материалах научно-технических конференций.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, пяти глав, заключения, списка использованных источников и приложения. В первой главе проведен анализ литературных источников по типам, конструкциям и методам анализа антенн с секторной и тороидальной ДН, формулируются цели и задачи диссертации. Вторая глава посвящена разработке математической модели антенной решетки вибраторных и рамочных излучателей, реализующей предложенный метод анализа характеристик излучения антенных решеток проволочных излучателей, основанный на методе ИУ и снимающий ограничение на число излучателей в решетке. В третьей главе приводятся результаты численного анализа характеристик излучения вибраторных (директорных) и рамочных антенн и решеток из таких антенн. В четвертой главе излагаются результаты численного анализа характеристик излучения зеркальных антенн. Пятая глава посвящена численному моделированию кольцевых и линейных антенных решеток проволочных излучателей с секторной и тороидальной ДН. В приложении приводятся математические модели антенн и антенных решеток, которые исследовались в диссертации и акты о практическом использовании результатов научной работы.

Общий объем диссертации составляет 128 машинописных страниц, включая: 116 рисунков на 42 страницах, 2 таблицы на 2 страницах, библиографический список из 78 наименований литературных источников на 6 страницах, из них 19 публикаций автора, приложений на 13 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, кратко излагаются основные результаты диссертации.

В **первой главе** проведен анализ источников информации по антеннам, имеющим секторную и тороидальную ДН, применяемым в различных радиосистемах

Рассмотрены варианты антенн, применяемых в локальных системах связи и радиолокационных системах различных диапазонов частот. Показано, что проектирование многоэлементных антенных решеток представляет собой трудную задачу, которая может быть решена с использованием точных методов электродинамического моделирования. Анализ литературы показал, что разработаны методы учета взаимосвязей в бесконечных антенных решетках для волноводных излучателей (Амитей Н. и др.), вибраторных излучателей (Бодров В.В. и др.), произвольных проволочных излучателей (Кудин В.П. и др.). Однако задача учета взаимосвязей в конечных решетках и, в частности, учет краевого эффекта требуют дальнейших исследований.

В системах ближней радиолокации и радиовидения используются зеркальные антенны, включая многолучевые, работающие в ближней или промежуточной зонах. Анализ их характеристик и параметров также требует применения достаточно строгих методов электродинамики.

Проведенный анализ источников научно-технической информации позволил сформулировать цели диссертации.

Во **второй главе** приведено обоснование использования для численного моделирования антенных решеток проволочных излучателей ИУ Поклингтона (1) и кусочно-постоянных функций в качестве базисных и весовых.

$$\int_L \left[G(l_q, l_p) \left(\vec{l}_o, \vec{S}_o \right) - \frac{1}{k^2} \frac{d^2 G(l_q, l_p)}{dl_p dl_q} \right] I(l_q) dl_q = -i \frac{4\pi}{\omega \mu_a} \left[\vec{E}_{cm}(l_p), \vec{l}_o \right], \quad (1)$$

где L – длина проводника;

$G(l_q, l_p)$ – функция Грина точечного источника;

\vec{l}_o, \vec{S}_o – единичные векторы, касательные к проводнику в точках наблюдения и истока.

$k = \frac{2\pi}{\lambda}$ – коэффициент фазы в среде;

$I(l_q)$ – искомый ток в проводнике;

ω – круговая частота поля возбуждения;

μ_a – абсолютная магнитная проницаемость среды, в которой расположен проводник;

$\vec{E}_{om}(l_p)$ – вектор стороннего поля, возбуждающего проводник.

Для кусочно-постоянных базисных и весовых функций уравнение (1) сводится к матричному уравнению:

$$\sum_{m=1}^M I_m K_{mn} = U_n, \quad (2)$$

где M – число сегментов, на которые разделен весь проводник длиной L ;
 m – номер сегмента, на котором расположена точка истока ($1 \leq m \leq M$);
 n – номер сегмента, на котором расположена точка наблюдения ($1 \leq n \leq M$).

Основное время расходуется на численное решение ИУ методом моментов, что связано с численным решением системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) высокого порядка. Известно, что время решения СЛАУ пропорционально M^3 , где M – порядок СЛАУ.

Автором предложен метод численного моделирования проволочных антенн, в частности, антенных решеток, позволяющий уменьшить время счета.

Для проволочного излучателя с большой волновой длиной проводников вся антенна разбивается на два фрагмента – активный, включая возбуждаемый от линии передачи элемент, и пассивный, включающий остальные элементы. Внутренняя задача для всей антенны решается в следующей последовательности:

1. Решается ИУ для активного фрагмента, и определяется распределение тока в проводниках этого фрагмента.

2. По найденному распределению тока в первом фрагменте (I_{ma}) находится поле в сегментах второго фрагмента, которое является сторонним для проводников второго фрагмента. Длина каждого сегмента значительно меньше длины волны и, вследствие этого, каждый сегмент пассивного фрагмента расположен в дальней зоне каждого сегмента активного фрагмента. Поэтому для определения поля на сегментах пассивного фрагмента можно воспользоваться методом векторного потенциала в следующем приближении:

$$E_j \approx -i \frac{60\pi}{\lambda} \int_{L_a} I_{ma} (\vec{S}_{om}, \vec{j}) \frac{e^{-ikR}}{R} l_a, \quad (3)$$

где R – расстояние от сегмента с номером m активного фрагмента до точки наблюдения на пассивном фрагменте;

L_a – длина проводника активного фрагмента;

$\vec{j} = x, y, z$; $\vec{j} = x_o, y_o, z_o$, – единичные векторы осей x, y, z .

При применении кусочно-постоянных функций в качестве базисных ток в пределах одного сегмента неизменен по амплитуде и фазе. Поэтому интегралы в (3) превращаются в суммы. С учетом этого можно определить касательную

составляющую E_r вектора \vec{E} поля активного фрагмента на сегментах пассивного фрагмента, которая фигурирует в правой части ИУ для тока (1):

$$E_r = E_{xn} \cos X_n + E_{yn} \cos Y_n + E_{zn} \cos Z_n. \quad (4)$$

3. По найденному полю находится распределение тока во втором фрагменте путем СЛАУ с правой частью, определяемой выражением:

$$U_n = - \sum_{m=1}^{Ma} I_{ma} (\cos X_m \cos X_n + \cos Y_m \cos Y_n + \cos Z_m \cos Z_n) \frac{e^{-ikR_{mn}}}{R_{mn}} \Delta L_m, \quad (5)$$

где $\cos X_m$, $\cos Y_m$, $\cos Z_m$ – направляющие косинусы сегмента с номером « m » (или « n »),

$$R_{mn} = \sqrt{(X_n - X_m)^2 + (Y_n - Y_m)^2 + (Z_n - Z_m)^2}, \quad (5)$$

$X_{n,m}$, $Y_{n,m}$, $Z_{n,m}$ – координаты центров сегментов с номерами « n » и « m ».

Описанный алгоритм применим, если антенна разбита на два фрагмента, из которых только один активный. Применение такого алгоритма целесообразно для сокращения времени моделирования директорных антенн с большим числом директоров и сложным рефлектором и других подобных антенн.

Основная проблема при численном моделировании антенных решеток заключается в учете взаимодействия излучателей между собой. Такое взаимодействие может быть учтено лишь достаточно строгими электродинамическими методами, такими как: метод бесконечной антенной решетки; метод поэлементного учета взаимодействия излучателей в решетке; метод, в котором учитывается взаимодействие каждого излучателя с ближайшим окружением (два-семь рядов окружения). Эти методы не позволяют учесть краевой эффект. Кроме того, эти методы разработаны лишь для отдельных конструкций излучателей.

В задаче моделирования конечной решетки вибраторных и рамочных излучателей с помощью предложенного алгоритма фрагментации необходимо этот алгоритм усложнить.

Рассматриваются, сравниваются между собой и с методом ИУ, примененным для всей решетки в целом, три способа, позволяющие уменьшить размерность задачи: способы 1 и 3, предложенные автором, и известный способ 2.

Способ 1. Вся решетка разбивается на 2 одинаковых фрагмента. Все излучатели первого и второго фрагментов возбуждены с заданным распределением амплитуд и фаз. Внутренняя задача для всей решетки решается в следующей последовательности:

- по заданному распределению амплитуд и фаз возбуждения излучателей решается ИУ для первого фрагмента и определяется распределение тока в проводниках этого фрагмента;

- по найденному распределению тока в первом фрагменте находится поле на сегментах второго фрагмента, которое является сторонним для проводников второго фрагмента;

- суммируется поле возбуждения излучателей второго фрагмента и стороннее поле на этих элементах, определенное на предыдущем шаге;

- по найденному суммарному стороннему полю находится распределение тока во втором фрагменте путем решения ИУ;
- по определенному таким образом току в элементах первого и второго фрагментов определяется поле всей решетки и ее параметры.

В этом методе учитывается взаимодействие между излучателями в составе решетки и учитывается краевой эффект.

Описанный алгоритм применим при приемлемых значениях порядка СЛАУ – не более 10000. Если число излучателей велико, то можно использовать известный способ 2, в котором учитывается взаимодействие излучателя с ближайшим окружением. При этом ИУ решается для выделенного фрагмента при возбуждении центрального излучателя и подключении ко всем остальным излучателям согласованных нагрузок. ДН активного излучателя далее используется для определения ДН решетки с использованием теоремы перемножения ДН. Входное сопротивление всех излучателей в составе конечной решетки считается таким же, как и у определенного активного излучателя. В таком методе приближенно учитывается взаимодействие каждого излучателя с ближайшим окружением, но не учитывается краевой эффект.

Способ 3. Вся решетка делится на N одинаковых фрагментов. Методом ИУ определяются ДН фрагмента и входное сопротивление каждого излучателя в составе фрагмента. По ДН фрагмента с использованием теоремы перемножения ДН определяется ДН всей решетки. Распределение входного сопротивления в излучателях всех фрагментов считается таким же, как в том, для которого применен метод ИУ. В этом методе учитывается взаимодействие излучателей в составе фрагмента, но не учитывается взаимодействие между фрагментами. Краевой эффект учитывается, но столько раз, сколько границ между фрагментами.

Применимость алгоритма 3 можно оценить двумя способами:

- путем сравнения результатов моделирования антенной решетки методом ИУ, примененным для всей решетки, с результатами моделирования способом 3;
- путем сравнения амплитуд токов в активном фрагменте с возбуждаемыми излучателями с заданным амплитудно-фазовым распределением и токов в пассивном фрагменте, излучатели которого нагружены на согласованные нагрузки.

Эти два способа оценки анализируются в главе 3.

Автором разработана математическая модель антенной решетки вибраторных (директорных) и рамочных антенн при спадающем к краям решетки амплитудном распределении и линейном фазовом распределении, в которой используется предложенный автором метод уменьшения размерности матричного уравнения для тока, реализованного в виде *способов 1, 2, 3*.

В основу разработки математической модели положены соотношения, описывающие метод моментов применительно к ИУ Поклингтона для тока в тонких проводниках [Вычислительные методы в электродинамике. Под ред. Р.Митры]. Эти соотношения изменены в соответствии с тем, что требует каждый из рассмотренных способов фрагментации многоэлементной проволочной

антенны, и дополнены соотношениями, описывающими геометрию директорных и рамочных антенн, которые являются излучателями рассматриваемых антенных решеток.

Модель позволяет численно рассчитывать решетки тремя способами, и реализована в виде двух программ AVK_FAR_SCAN и FAR_ALFA.

В третьей главе диссертационной работы приведены результаты моделирования директорных и рамочных антенн, решеток таких антенн, тремя способами, рассмотренными в главе 2.

Проведено численное моделирование директорных антенн с различным числом директоров, с линейным, плоским и уголковым рефлекторами. В активный фрагмент включалось различное число элементов – от только активного вибратора до всех элементов без последнего директора. Некоторые результаты моделирования представлены на рисунке 1 для директорной антенны с 10 директорами.

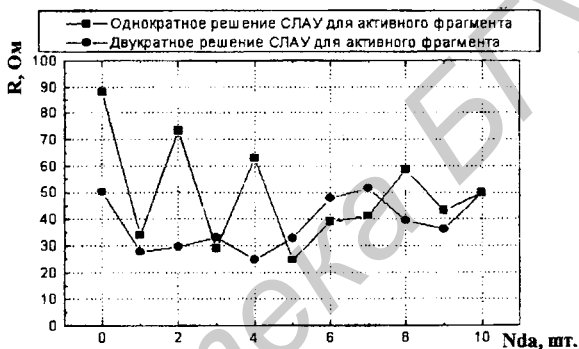


Рисунок 1 – Зависимости входного сопротивления от числа директоров в активном фрагменте

Проведенное моделирование позволяет сделать выводы:

- если пассивный и активный фрагменты содержат примерно одинаковое число сегментов, применение метода фрагментации при однократном применении метода ИУ для активного фрагмента уменьшает время решения задачи примерно в 8 раз, при двукратном применении – в 4 раза;
- при однократном применении метода ИУ для активного фрагмента ошибка в определении входного сопротивления больше, чем при двукратном, но при увеличении числа излучателей в активном фрагменте ошибки сравнимы;
- более существенная погрешность получается при определении реактивной части входного сопротивления.

В директорной антенне имеет место сильная взаимосвязь между активным и пассивным фрагментами, о чем можно судить по амплитуде тока в этих фрагментах – рисунок 2 (всего в антенне 1000 сегментов). С использованием метода фрагментации амплитуда тока в активном фрагменте меньше, что приводит к получению завышенного значения входного сопротивления.

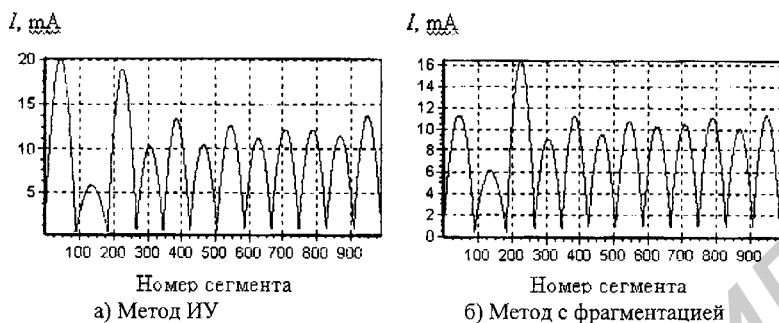


Рисунок 2 – Распределение тока в элементах антенны

Проводилось численное моделирование антенных решеток методом фрагментации с делением решетки на два одинаковых фрагмента (способ 1). Моделирование показало, что:

- параметры решетки, рассчитанные с применением метода фрагментации, несущественно отличаются от параметров, получаемых без применения этого метода;
- чем больше излучателей в решетке, тем меньше ошибка в определении параметров решетки, обусловленная фрагментацией, и тем больше выигрыш во времени решения задачи;
- ошибка в определении параметров решетки с применением метода фрагментации по сравнению с методом ИУ, примененным для всей решетки, не превосходит погрешностей экспериментального определения параметров;
- применение метода фрагментации существенно (в 10 и более раз при решении внутренней и внешней задач в целом) сокращает время численного определения параметров решетки.

Несмотря на существенное сокращение времени счета, при большом числе излучателей в решетке такой метод может не позволить провести численное моделирование решетки. Численный анализ таких решеток может быть произведен с использованием известного **способа 2** или предложенного **способа 3**.

Численное моделирование антенных решеток **способом 2** показало, что, чем меньше число излучателей в одном фрагменте, тем с большей погрешностью определяется входное сопротивление. Входное сопротивление считается во всех излучателях одинаковым и равным входному сопротивлению центрального излучателя выделенного фрагмента при пассивных остальных излучателях фрагмента, нагруженных на согласованные нагрузки. Метод 2 не учитывает краевой эффект в решетке.

Проведено численное моделирование линейных Е- и Н-плоскостных решеток и плоских решеток вибраторных излучателей **способом 3**. Краевой эффект учитывается столько раз, сколько фрагментов в решетке. Для иллюстрации на рисунке 3 приведены зависимости входного сопротивления от номера излучателя в линейной Е-плоскостной решетке из 18 излучателей.

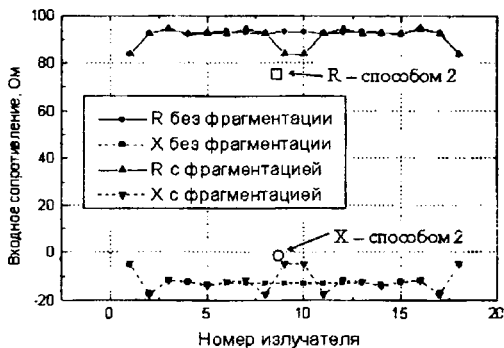


Рисунок 3 – Зависимость входного сопротивления от номера излучателя

Как видно, при фрагментации решетки краевой эффект учитывается на стыках фрагментов, где его на самом деле нет. Однако даже при этом ошибка определения входного сопротивления излучателей, расположенных на стыках фрагментов, меньше, чем получаемая известным методом 2.

Если фрагмент включает N излучателей, то в нем с незначительной ошибкой, обусловленной фрагментацией, будет определяться входное сопротивление в $N-2$ излучателях. С ростом N число излучателей, в которых входное сопротивление определяется с заметной ошибкой, уменьшается.

Проведенное сравнение трех способов численного моделирования антенных решеток показало, что с точки зрения определения КНД и ДН все три способа практически эквивалентны. Но при определении входного сопротивления более близкие значения к значениям, полученным методом ИУ, дает способ 3.

Для подтверждения полученных выводов было проведено моделирование антенных решеток рамочных антенн и показано, что точность расчета ДН и КНД с использованием метода фрагментации независимо от способа практически одинакова; входное сопротивление более точно определяется при использовании способа 3. При этом время определения всех характеристик и параметров многоэлементной решетки уменьшается в $(M/N)^3$, где M – общее число излучателей в решетке, N – число излучателей в одном фрагменте. Ошибка определения входного сопротивления способом 3 уменьшается с увеличением числа N .

В четвертой главе описана разработанная математическая модель зеркальной антенны обобщенной конструкции и результаты численного моделирования такой антенны.

Исследованиям зеркальной антенны посвящено много статей, монографий, учебных пособий. В этих работах не рассмотрены вопросы распределения поля вдоль фокальной оси в ближней зоне, распределение поля в плоскости, параллельной плоскости раскрыва, расположенной в ближней зоне, или, в общем случае, распределение поля в заданной области пространства. Не рассмотрены вопросы влияния выноса облучателя из фокуса на поле в ближней зоны и случайных ошибок при изготовлении профиля зеркала.

Анализ имеющихся работ позволил определить основные задачи по разработке математической модели и реализующей ее программы численного моделирования зеркальной антенны:

1. Для разработки математической модели целесообразно использовать метод физической оптики, модифицировав его в следующих направлениях:
 - учесть конечные размеры раскрыва облучателя при определении токов на облучаемом зеркале, не считая облучатель точечным;
 - учесть реальное распределение фаз поля на раскрыве облучателя, обусловленное конечностью глубины рупора облучателя;
 - отказаться от геометро-оптического приближения при определении поля облучателя на поверхности зеркала.
2. Предусмотреть возможность расчета поля антенны в любой точке пространства, включая ближнюю зону.
3. Учесть случайные ошибки выполнения профиля зеркала.
4. Предусмотреть возможность расчета поля антенны с отражателями различного типа.
5. Предусмотреть возможность расчета параметров однозеркальной и двухзеркальной антенн.

Рассмотрена зеркальная антенна с отражателем в виде произвольной вырезки из параболоида вращения. В качестве облучателя использован пирамидальный рупор с основной волной H_{10} - рисунок 4.

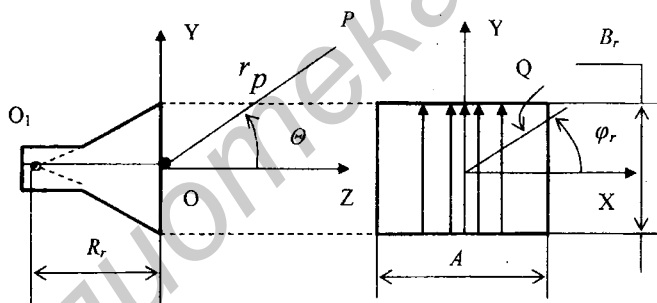


Рисунок 4 – Пирамидальный рупор

Поле рупора в точке P на поверхности параболоида определено апертурным методом. В соответствии с ним:

$$\vec{E} = \frac{i}{2L} \int_S \dot{E}_s (1 + \cos u_k) \left(\vec{u}_k \cos \varphi_k - \vec{\varphi}_k \sin \varphi_k \right) \frac{e^{-kr_k}}{r_k} dS, \quad (7)$$

где $\vec{\theta}_0$, $\vec{\varphi}_0$ - единичные векторы сферической системы координат, центр которой совпадает с началом прямоугольной системы координат;

$\dot{E}_s = E_s(x_r, y_r) e^{i\varphi_s(x_r, y_r)}$ - амплитудно-фазовое распределение поля на раскрыве рупора;

$E_s = E_m \cdot \cos\left(\frac{\pi x_r}{A_r}\right)$ - распределение амплитуд на раскрыве рупора;

E_m - максимальная амплитуда электрического поля на раскрыве рупора, зависящая от мощности P_r , излучаемой рупором;

$\Psi(x_r, y_r) = \Psi_x(x_r) \cdot \Psi_y(y_r)$ - фазовое распределение на раскрыве рупора;

$r_p = \sqrt{(x_k - x_r)^2 + (y_k - y_r)^2 + (z_k - z_r)^2}$ - расстояние между точками P и

Q .

В качестве рефлектора рассмотрена вырезка из параболоида вращения, показанная на рисунке 5.

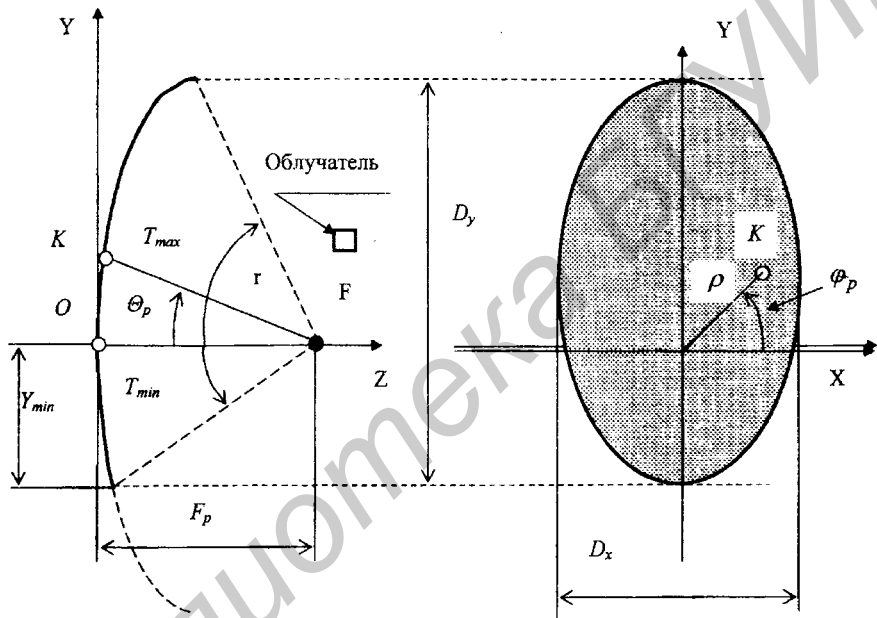


Рисунок 5 – Параболический рефлектор

Для определения токов на рефлекторе и последующего определения поля этих токов поверхность рефлектора заменена сеточной моделью. Вектор плотности поверхностного тока представляется в виде суммы

$$\vec{J} = \vec{J}_x + \vec{J}_y + \vec{J}_z, \quad (8)$$

По вектору \vec{J} определяется поле рефлектора в заданной точке пространства P .

$$\vec{E} = -i\omega \vec{A}; \quad \vec{A} = \frac{M_0}{4p} \int_S \frac{e^{-kR_{kp}}}{R_{kp}} dS, \quad (9)$$

где S – поверхность параболоида;

R_{kp} - расстояние между точкой на поверхности параболоида и точкой наблюдения.

Аналогично описывается двухзеркальная антенна типа Кассегрена. Учета случайная ошибка выполнения профиля рефлектора и контррефлектора.

Математическая модель зеркальной антенны реализована в разработанной программе «Reflektor».

Проведено подробное численное моделирование зеркальных антенн с различными геометрическими параметрами элементов.

Проведенные исследования позволяют сделать выводы:

- в распределении амплитуд поля вдоль фокальной оси наблюдается колебательный характер до некоторого расстояния, после которого амплитуда поля монотонно уменьшается – рисунок 6 (D , Fp – диаметр и фокусное расстояние рефлектора);

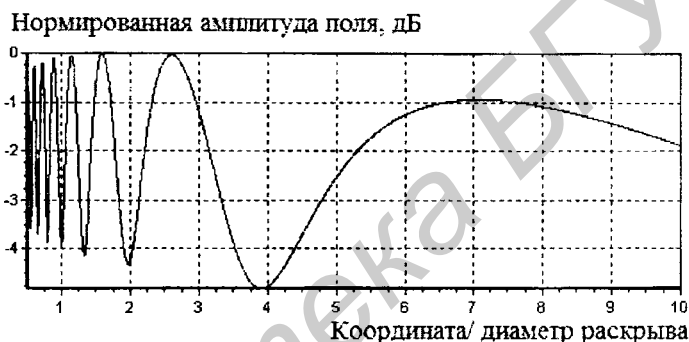


Рисунок 6 – Распределение амплитуды поля вдоль фокальной оси несфокусированной антенны при $D/\lambda=30$; $Fp/D=0,5$

- точка максимума амплитуды поля на фокальной оси не является точкой фокусировки по критерию параметров ДН;

- в сфокусированной антенне последний максимум приблизительно соответствует точке фокусировки;

- в сфокусированной в ближнюю зону антенне при уменьшении расстояния до точки фокусировки ширина главного лепестка ДН растет незначительно по сравнению с ее значением для дальней зоны, но уровень первых боковых лепестков растет, КНД антенны уменьшается.

В пятой главе с помощью разработанных программ «Metka_Bicon» и «AVK_Franc_F», реализованных с использованием метода ИУ, численно исследованы новые варианты построения антенн вертикальной поляризации с изотропной в горизонтальной плоскости и секторной ДН. В отличие от известных антенн, представляющих собой линейные вертикальные решетки вибраторных антенн и требующих применения системы распределения мощности, предложенные антенны имеют только одну точку возбуждения. В числе предложенных антенн численно и частично экспериментально исследованы биконусная

антенна с кольцевой или дуговой решеткой директорных антенн, представленная на рисунке 7, и модификации антенны Франклина, представленные на рисунке 8. На рисунке 8 вариант 1 показана известная антенна Франклина, на рисунке 8 варианты 2,3 – предложенные модификации.

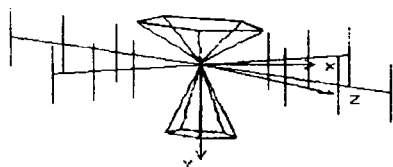


Рисунок 7 – Биконусная антенна с директорами

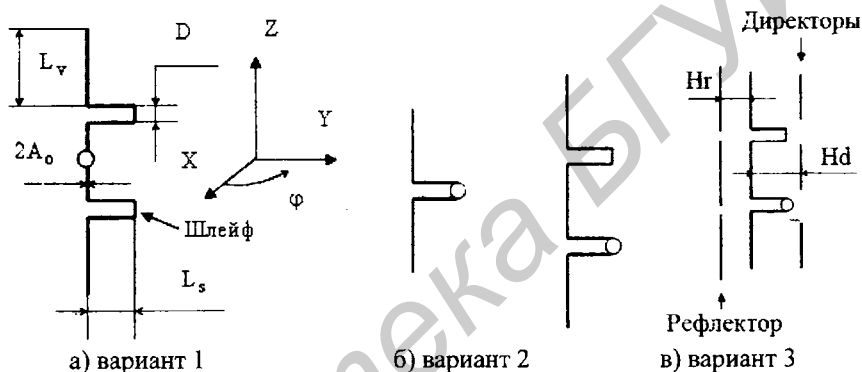


Рисунок 8 – Антенна Франклина и ее модификации

Показано, что применение в биконусной антенне системы директоров сужает главный лепесток ДН в вертикальной плоскости, что ведет к увеличению КНД примерно на 2 дБ. Диапазонные свойства биконусной антенны при этом ухудшаются, но диапазонные свойства лучше, чем в известной вертикальной антенной решетке вибраторных антенн – рисунки 9, 10. При расположении директорных антенн по дуге окружности можно сформировать секторную ДН.

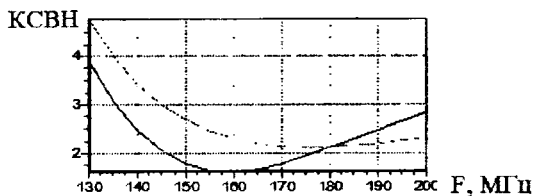


Рисунок 9 – Зависимость КСВ от частоты

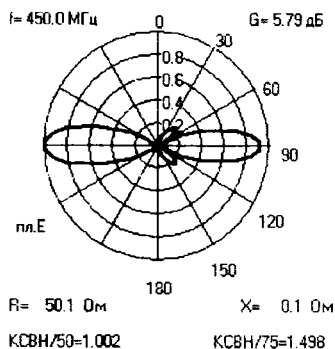


Рисунок 10 – ДН биконусной антенны с тремя директорами

Предложенные модификации антенны Франклина имеют большую полосу пропускания по критерию согласования и позволяют формировать в горизонтальной плоскости не только квазиизотропную ДН, но и секторную ДН, если применить дополнительные линейные рефлекторы, как показано на рисунке 8, вариант 3.

Ширина главного лепестка ДН в вертикальной плоскости и КНД зависят от числа секций в линейной решетке. На рисунке 11 представлена зависимость КСВ от частоты для антенны из двух секций. При этом КНД примерно на 2,5 дБ больше, чем у полуволнового вибратора. Квадратиками обозначены значения экспериментально измеренной зависимости; R_{ϕ} – волновое сопротивление питающего фидера.

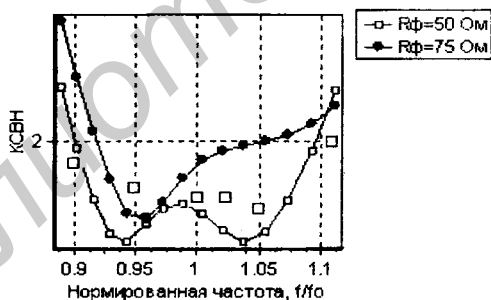


Рисунок 11 – Зависимость КСВ от частоты

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации:

Основные результаты и выводы по диссертационной работе формулируются следующим образом.

1. Разработан метод численного моделирования антенных решеток проволочных излучателей с секторной ДН, основанный на методе ИУ, отличаю-

щийся тем, что снимает ограничения на волновые размеры решетки [6-А, 7-А, 12-А, 13-А, 16-А, 17-А].

2. Разработана математическая модель антенной решетки вибраторных (директорных) и рамочных антенн, при спадающем к краям решетки амплитудном распределении и линейном фазовом распределении, основанная на методе ИУ [8-А, 10-А, 12-А, 16-А, 17-А].

3. Разработана математическая модель кольцевой и линейной антенной решетки проволочных антенн с секторной и изотропной в горизонтальной плоскости ДН и проведено ее численное моделирование разработанным методом [2-А, 7-А – 11-А, 19-А].

4. Разработана математическая модель зеркальной антенны обобщенной конструкции [4-А], отличающаяся тем, что:

- не использует общепринятых приближений о том, что рефлектор (или контррефлектор) расположен в дальней зоне облучателя и облучатель является точечным;

- позволяет анализировать поле антенны в произвольной зоне пространства (дальней, промежуточной, ближней) и исследовать вопросы фокусировки антенны в ближнюю зону при сканировании.

5. Предложены новые варианты построения антенных решеток с изотропной ДН в горизонтальной плоскости, отличающиеся от известных расширенной полосой частот и упрощенной конструкцией. [1-А, 2-А, 5-А – 11-А, 14-А, 16-А – 19-А].

6. Методом численного моделирования обнаружены новые закономерности:

- колебательный характер распределения поля зеркальной антенны в ближней зоне [4-А];

- зависимость параметров диаграммы направленности зеркальной антенны при сканировании и фокусировке антенны в ближнюю зону [4-А];

- зависимость электрических характеристик и параметров новых конструкций антенн с изотропной диаграммой направленности в горизонтальной плоскости от их геометрических размеров [2-А, 8-А – 11-А, 18-А, 19-А].

Рекомендации по практическому использованию результатов диссертации

Предложенный метод расчета может быть использован для расчета характеристик других типов проволочных антенн, позволяя сократить время счета.

Разработанные программы численного моделирования зеркальной антенны обобщенной конструкции, антенных решеток директорных и рамочных антенн, кольцевой решетки директорных антенн, биконусной антенны могут быть использованы при проектировании таких антенн инженерами-разработчиками.

Результаты диссертационной работы использованы при выполнении задания по ГНП «Информационные технологии» совместно с ИИТ БГУИР и ОКР «Навес-У» совместно с РУП «КБ Радар», о чем имеются акты о практическом использовании результатов научной работы.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в научных журналах:

1-А. Лихачевский, Д.В. Диапазонные свойства проволочных биконусных антенн / Д.В. Лихачевский // Известия Белорусской инженерной академии. – 2005. – № 1(19)/4. – С. 63 – 65.

2-А. Юрцев, О.А. Биконусные антенны с директорами / О.А. Юрцев, Д.В. Лихачевский, Ю.Ю. Бобков // Доклады БГУИР. – 2006. – №3(15). – С. 72 – 75.

3-А. Аль-Рифаи, А. Оптимизация рамочных антенн по входному сопротивлению / А. Аль-Рифаи, Д.В. Лихачевский, О.А. Юрцев // Доклады БГУИР. – 2007. – № 3(19). – С. 37-42.

4-А. Юрцев, О.А. Ближнее поле и фокусировка зеркальной антенны / О.А. Юрцев, Н.М. Наумович, Д.В. Лихачевский // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – Самара, 2007. – Том 10, №2. – С. 39 – 45.

Статьи в сборниках материалов конференций:

5-А. Аль-Рифаи, А. Численное моделирование рамочных антенн / А. Аль-Рифаи, Д.В. Лихачевский, О.А. Юрцев // Физика и технические приложения волновых процессов, материалы V международной НТК. Самара, 11 – 17 сентября 2006 г. – Самара: 2006. – С. 181 – 182.

6-А. Юрцев, О.А. Поле в ближней зоне вибраторных и рамочных антенн / О.А. Юрцев, Ю.Ю. Бобков, Д.В. Лихачевский // Физика и технические приложения волновых процессов, материалы V международной НТК. Самара, 11 – 17 сентября 2006 г. – Самара: 2006. – С. 221 – 223.

7-А. Bobkov, Y.Y. Numerical modeling of wire multi-element antenna array / Y.Y. Bobkov, O.A. Yurtsev, D.V. Lihachevsky // Materials Science International Conference on Antenna Theory and Techniques. Proceedings, Ukraine, Sevastopol, 17-21 September, 2007. – Sevastopol: 2007. – P. 384-386.

Тезисы докладов в сборниках материалов конференций:

8-А. Лихачевский, Д.В. Кольцевая антенная решетка директорных антенн // Молодежь и современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций “РТ – 2006”, материалы международной НТК студентов, аспирантов и ученых. Севастополь, 17-21 апреля 2006г. – Севастополь: 2006. – С. – 80.

9-А. Бобков, Ю.Ю. Объемная антенна Франклина / Ю.Ю. Бобков, Д.В. Лихачевский // Молодежь и современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций “РТ – 2006”, материалы международной НТК студентов, аспирантов и ученых. Севастополь, 17-21 апреля 2006г. – Севастополь: 2006. – С. – 70.

10-А. Бобков, Ю.Ю. Антенные решетки с изотропной диаграммой направленности в горизонтальной плоскости / Ю.Ю. Бобков, Д.В. Лихачевский // Молодежь и современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций “РТ – 2006”, материалы международной НТК студентов, аспирантов и ученых. Севастополь, 17-21 апреля 2006г. – Севастополь: 2006. – С. – 69.

11-А. Лихачевский, Д.В. Взаимодействие директорных антенн в плоской антенной решетке // Молодежь и современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций “РТ-2007”, материалы 3-й Международной молодежной НТК

студентов, аспирантов и ученых. Севастополь, 16-21 апреля 2007 г. – Севастополь: 2007. – С. 95.

12-А. Лихачевский, Д.В. Широкополосная антенна, ненаправленная в горизонтальной плоскости / Д.В. Лихачевский, О.А. Юрцев, Н.М. Наумович, А.Е. Карьков // Проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств, сб. мат. IV Международной НТК. Новополюк, 25-26 мая 2006г. – Новополюк: 2006. – Том 2. – С. 63-65.

13-А. Лихачевский, Д.В. Фрагментация проволочной антенны при численном анализе методом моментов // Молодежь и современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций “РТ-2007”, материалы 3-й Международной молодежной НТК студентов, аспирантов и ученых. Севастополь, 16-21 апреля 2007 г. – Севастополь: 2007. – С. 98.

14-А. Бобков, Ю.Ю. Антенна для метки RFID – системы / Ю.Ю. Бобков, Д.В. Лихачевский // Молодежь и современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций “РТ-2007”, материалы 3-й Международной молодежной НТК студентов, аспирантов и ученых. Севастополь, 16-21 апреля 2007 г. – Севастополь: 2007. – С. 99.

15-А. Чекан, С.А. Влияние рефлектора на характеристики директорной антенны / С.А. Чекан, Д.В. Лихачевский // Молодежь и современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций “РТ-2007”, материалы 3-й Международной молодежной НТК студентов, аспирантов и ученых. Севастополь, 16-21 апреля 2007 г. – Севастополь: 2007. – С. 101.

16-А. Бобков, Ю.Ю. Численное моделирование многоэлементных антенных решеток проволочных излучателей методом интегральных уравнений / Ю.Ю. Бобков, Д.В. Лихачевский, О.А. Юрцев // Современные проблемы радиоэлектроники, материалы 7-ой всероссийской НТК молодых ученых и студентов. Красноярск, 4-5 мая 2007 г. – Красноярск: 2007. – С. 196 – 198.

17-А. Лихачевский, Д.В. Поле в ближней зоне вибраторных антенных решеток / Д.В. Лихачевский, О.А. Юрцев // Современные проблемы радиоэлектроники, материалы 7-ой всероссийской НТК молодых ученых и студентов. Красноярск, 4-5 мая 2007 г. – Красноярск: 2007. – С. 206 – 209.

18-А. Лихачевский, Д.В. Сравнительный численный анализ рамочных антенн с директорами и директорных антенн / Д.В. Лихачевский, Ю.Ю. Бобков, О.А. Юрцев // Современные проблемы радиоэлектроники, материалы 7-ой всероссийской НТК молодых ученых и студентов. Красноярск, 4-5 мая 2007 г. – Красноярск: 2007. – С. 211 – 214.

19-А. Бобков, Ю.Ю. Новые конструкции рамочных и вибраторных антенн / Ю.Ю. Бобков, Д.В. Лихачевский, О.А. Юрцев // Современные проблемы радиоэлектроники, материалы 7-ой всероссийской НТК молодых ученых и студентов. Красноярск, 4-5 мая 2007 г. – Красноярск: 2007. – С. 193 – 195.

Ліхачэўскі Дзмітрый Віктаравіч

ЛІКАВАЕ МАДЭЛЯВАННЕ АНТЭН З СЕКТАРНАЙ І ТАРАІДАЛЬНАЙ ДЫЯГРАМАМІ СКІРАВАНАСЦІ

Ключавыя словы: антэнная рашотка, вібратарныя і рамачныя антэны, метады інтэгральных ураўненняў, люстраная антэна.

Мэта працы – распрацаваць:

– метады лікавага мадэлявання шматэлементных антэнных рашотак з выкарыстаннем інтэгральных ураўненняў у тонкіх правадырах, які здымае абмежаванні на хвалевыя памеры рашоткі, і дазваляе выкарыстаць яго для мадэлявання антэнных рашотак вібратарных і рамачных выпраменьвальнікаў з рознымі схемамі размяшчэння выпраменьвальнікаў, з сектарнай і тараідальнай дыяграмамі скіраванасці.

– матэматычную мадэль люстраной антэны абагульненай канструкцыі, якая дазваляе даследаваць заканамернасці размеркавання поля ў блізкай і далёкай зонах пры сканаванні і факусоўцы антэны.

Распрацаваны метады заснаваны на ўжыванні інтэгральнага ўраўнення для току ў тонкіх правадырах і дазваляе разлічваць антэнныя рашоткі драцяных выпраменьвальнікаў без абмежавання ліку выпраменьвальнікаў у рашотцы. Пры гэтым інтэгральнае ураўнанне ўжываецца да фрагмента рашоткі, што забяспечвае высокую дакладнасць азначэння характарыстак антэны, уласціваю метаду інтэгральных ураўненняў. З выкарыстаннем прапанаванага метаду распрацавана матэматычная мадэль антэннай рашоткі вібратарных і рамачных выпраменьвальнікаў і праграмае забеспячэнне, якое рэалізуе матэматычную мадэль.

Лікава даследаваны характарыстыкі антэнных рашотак вібратарных (дырэктарных) і рамачных антэн у залежнасці ад геаметрычных памераў і часціні.

Распрацавана матэматычная мадэль люстраной антэны, якая дазваляе аналізаваць поле антэны ў любой кропцы прасторы і даследаваць пытанні факусоўкі антэны ў блізкую зону. Праведзенае мадэляванне дазволіла выявіць новыя заканамернасці:

– поле люстраной антэны ў блізкай зоне носіць вагальны характар;

– залежнасць параметраў дыяграмы скіраванасці люстраной антэны пры сканаванні і факусоўцы антэны ў блізкую зону;

– залежнасць плямы факусоўкі ў картычнай плоскасці ад хвалевых памераў раскрыва люстраной антэны і ад адлегласці да плоскасці факусоўкі.

Распрацаваны матэматычныя мадэлі новых варыянтаў пабудовы антэнных рашотак з ізатропнай дыяграмай скіраванасці ў гарызантальнай плоскасці, заснаваныя на метадах інтэгральных ураўненняў.

Лихачевский Дмитрий Викторович

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АНТЕНН С СЕКТОРНОЙ И ТОРОИДАЛЬНОЙ ДИАГРАММАМИ НАПРАВЛЕННОСТИ

Ключевые слова: антенная решетка, вибраторные и рамочные антенны, метод интегральных уравнений, зеркальная антенна.

Цель работы – разработать:

- метод численного моделирования многоэлементных антенных решеток с использованием интегральных уравнений в тонкопроволочном приближении, снимающий ограничение на волновые размеры решетки, и использовать его для моделирования антенных решеток вибраторных и рамочных излучателей с различными схемами размещения излучателей, с секторной и тороидальной ДН.

- математическую модель зеркальной антенны обобщенной конструкции, позволяющую исследовать закономерности распределения поля в ближней и дальней зонах при сканировании и фокусировке антенны.

Разработанный метод основан на применении интегрального уравнения для тока в тонких проводниках и позволяет рассчитывать антенные решетки проволочных излучателей без ограничения числа излучателей в решетке. При этом интегральное уравнение применяется к фрагменту решетки, что обеспечивает высокую точность определения характеристик антенны, присущую методу интегральных уравнений. С использованием предложенного метода разработана математическая модель антенной решетки вибраторных и рамочных излучателей и программное обеспечение, реализующее математическую модель.

Численно исследованы характеристики антенных решеток вибраторных (директорных) и рамочных антенн в зависимости от геометрических размеров и частоты.

Разработана математическая модель зеркальной антенны, позволяющая анализировать поле антенны в любой точке пространства. Проведенное моделирование позволило обнаружить новые закономерности:

- поле зеркальной антенны в ближней зоне носит колебательный характер;

- зависимость параметров диаграммы направленности зеркальной антенны при сканировании и фокусировке антенны в ближнюю зону;

- зависимость пятна фокусировки в картинной плоскости от волновых размеров раскрыва зеркальной антенны и от расстояния до плоскости фокусировки.

Разработаны математические модели новых вариантов построения антенных решеток с изотропной диаграммой направленности в горизонтальной плоскости, основанные на методе интегральных уравнений.

SUMMARY

Likhachevsky D. V.

NUMERICAL MODELLING OF AERIALS WITH THE SECTOR AND TOROIDAL DIAGRAMS OF THE ORIENTATION

Keywords: an antenna lattice, dipole and frame aerials, a method of the integrated equations, the mirror aerial.

The work purpose to develop:

- the method of numerical modelling of multielement antenna lattices with use of the integrated equations of thin wire the approach, taking restriction on the wave measurements of a lattice and to use it for modelling of antenna lattices of dipole and frame radiators with various schemes of placing of radiators, with sector and toroidal directional diagram.

- mathematical model of the mirror aerial of the generalised design, allowing to investigate laws of distribution of a field in near and far zones at scanning and aerial focusing.

The developed method is based on application of the integrated equation for a current in thin conductors and allows to count antenna lattices of wire radiators without restriction of number of radiators in a lattice. Thus the integrated equation is applied to a lattice fragment that provides high accuracy of definition of characteristics of the aerial, inherent in a method of the integrated equations. With use of the offered method the mathematical model of an antenna lattice of dipole both frame radiators and the software realising mathematical model is developed.

Characteristics of antenna lattices dipole and frame aerials depending on the geometrical sizes and frequency are numerically investigated.

The mathematical model of the mirror aerial is developed, allowing to analyze an aerial field in any point of space and to investigate questions of focusing of the aerial in a near zone. The spent modelling has allowed to find out new laws:

- the field of the mirror aerial in a near zone has oscillatory character;
- dependence of parametres of the diagramme of an orientation of the mirror aerial at scanning and aerial focusing in a near zone;
- dependence of a stain of focusing in a picture plane from the wave sizes *раскрыва* the mirror aerial and from distance to a focusing plane.

Mathematical models of new variants of construction of antenna lattices with the isotropic diagram of an orientation in the horizontal plane, based on a method of the integrated equations are developed.

ЛИХАЧЕВСКИЙ ДМИТРИЙ ВИКТОРОВИЧ

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АНТЕНН С СЕКТОРНОЙ И
ТОРОИДАЛЬНОЙ ДИАГРАММАМИ НАПРАВЛЕННОСТИ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности 05.12.07 – Антенны, СВЧ устройства и их технологии

Подписано в печать 02.05.2008.
Гарнитура «Таймс».
Уч.-изд. л. 1,4.

Формат 60x84 1/16.
Печать ризографическая.
Тираж 60 экз.

Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 1,63.
Заказ 254.

Издатель и полиграфическое исполнение: Учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»
ЛИ №02330/0056964 от 01.04.2004. ЛП №02330/0131666 от 30.04.2004.
220013, Минск, П. Бровки, 6