

**УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ  
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ»**

УДК 621.396.67

**Абдильмуни Ахмед Аль-Рифаи**

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК РАССЕЯНИЯ  
АНТЕННЫХ РЕШЕТОК ВИБРАТОРНЫХ И РАМОЧНЫХ АНТЕНН**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

по специальности 01.04.03 «Радиофизика»

Минск, 2007

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:

Гринчик Николай Николаевич, доктор физико-математических наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории сушильно-термических и биотепловых процессов ГНУ «Института тепло- и массообмена им. А.В.Лыкова НАН Беларуси»

Малый Сергей Владимирович, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры радиопизики Белорусского государственного университета.

Оппонирующая организация:

учреждение образования «Военная академия  
Республики Беларусь».

Защита состоится 17 января 2008 года в 14:00 на заседании совета по защите диссертаций Д 02.15.05 при учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, г. Минск, ул. П.Бровки, 6 (1 уч. корпус), ауд. 232, тел. 293-89-89, [dissovet@bsuir.by](mailto:dissovet@bsuir.by)

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

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы обусловлена тем, что поле рассеяния вибраторных и рамочных антенн существенно увеличивает радиолокационную заметность объектов, на которых установлены антенны, но исследовано недостаточно.

### **Связь работы с крупными научными программами, темами**

Тема работы инициативная, учитывает задачи, стоящие перед войсками ПВО Сирии, утверждена решением Ученого совета БГУИР (протокол № 8 от « 27 » апреля 2007 г.) и приказом Ректора БГУИР № 245 от « 15 » сентября 2006 г.

### **Цель и задачи исследования**

Разработать эффективный метод численного анализа рассеивающих свойств антенных решеток проволочных излучателей, позволяющий с высокой точностью моделировать диаграмму рассеяния (ДР) и эффективную площадь рассеяния (ЭПР) без ограничений на волновые размеры решетки.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Разработан метод численного моделирования характеристик рассеяния многоэлементных антенных решеток проволочных антенн, отличающийся от известных учетом взаимодействия между излучателями и отсутствием ограничений на волновые размеры решетки.

2. Разработаны математические модели вибраторных и рамочных антенн и решеток из таких антенн в режиме рассеяния, отличающиеся тем, что взаимодействие между излучателями учитывается в составе фрагмента решетки методом интегральных уравнений, что позволяет численно анализировать характеристики рассеяния решеток без ограничения числа излучателей и сокращает время решения задачи рассеяния на порядки.

3. Проведено численное моделирование характеристик рассеяния вибраторных и рамочных антенн и решеток из таких антенн. Впервые исследованы ДР и ЭПР антенн в широком интервале изменения их геометрических параметров, частоты и направления облучения. Определено число излучателей в одном фрагменте, достаточное для определения ДР и ЭПР решетки с заданной точностью.

4. Впервые исследованы характеристики рассеяния антенной решетки РЛС метрового диапазона «П-18» и «Восток».

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Метод анализа характеристик рассеяния антенных решеток проволочных антенн, отличающийся от известных учетом взаимодействия между излучателями и отсутствием ограничений на волновые размеры решетки.

2. Математические модели вибраторных и рамочных антенн и антенных решеток в режиме рассеяния, отличающиеся тем, что взаимодействие между излучателями учитывается в составе фрагмента решетки методом ин-

тегральных уравнений, что позволяет численно анализировать характеристики рассеяния решеток с заданной точностью без ограничения числа излучателей и сокращает время решения задачи рассеяния на порядки.

3. Неизвестные ранее закономерности в зависимости рассеивающих свойств антенных решеток вибраторных и рамочных излучателей от их геометрических параметров, частоты и направления облучения:

- преобладание значения ЭПР директорных антенн в переднем полупространстве;
- преобладание значения ЭПР рамочных антенн в заднем полупространстве;
- рост значения ЭПР с увеличением коэффициента усиления антенн;
- расположение максимальных значений ЭПР в частотном диапазоне, соответствующем рабочему диапазону частот режима излучения.

4. Значения ДР и ЭПР радиолокационных станций «П-18» и «Восток» в широком диапазоне частот.

#### **Личный вклад соискателя**

1. Предложен метод численного моделирования многоэлементных антенных решеток, основанный на комбинации метода интегральных уравнений и метода расчета ЭПР сложных радиолокационных объектов.

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

3. Проведено численное моделирование рамочных, вибраторных антенн и многоэлементных антенных решеток из таких антенн, сделаны выводы о закономерностях рассеяния.

*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**

Материалы диссертации докладывались и обсуждались на 6 международных научно-технических конференциях (НТК): 2-я Международная молодежная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и ученых «Молодежь и современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций РТ-2006» (Украина, Севастополь, 2006г.); 16-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии Крымико-2006» (Севастополь, Крым, 2006г.); V Международная научно-техническая конференция «Физика и технические приложения волновых процессов» (Россия, Самара, 2006г.); 11-th International Conference on «Mathematical methods in electromagnetic theory MMET 2006» (Ukraine, Kharkov, 2006г.); 3-я Международная молодежная научно-техническая конференция «Современ-

ные проблемы радиотехники и телекоммуникаций РТ-2007» (Украина, Севастополь, 2007г.); 6-th International Conference on «Antenna Theory and Techniques» (Ukraine, Sevastopol, 2007г.).

### **Опубликованность результатов диссертации**

Изложенные в диссертационной работе материалы опубликованы в 13 печатных работах общим объемом 25 страниц, в том числе 6 статей в научно-технических журналах, тезисы 7 докладов в материалах научно-технических конференций.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения; общей характеристики работы, пяти глав, заключения, списка использованных источников. В первой главе проведен анализ литературных источников, посвященных вопросам рассеяния электромагнитных волн антеннами, и формулируется задача диссертации. Вторая глава посвящена разработке математической модели антенной решетки вибраторных и рамочных излучателей, реализующей предложенный метод анализа характеристик рассеяния антенных решеток проволочных излучателей. В третьей главе приводятся результаты численного анализа характеристик рассеяния вибраторных (директорных) антенн и решеток из таких антенн. В четвертой главе излагаются результаты численного анализа характеристик рассеяния рамочных антенн и решеток рамочных антенн. Пятая глава посвящена анализу характеристик рассеяния РЛС метрового диапазона «П-18» и «Восток».

Общий объем диссертации составляет 116 страниц, включая: 120 рисунков, 1 таблицу, библиографический список из 42 наименований литературных источников на 3 страницах, список собственных публикаций соискателя из 13 наименований на 2 страницах.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

*Во введении* обосновывается актуальность темы диссертации, кратко формулируется задача диссертации и описывается метод ее решения.

*В первой главе* проводится обзор литературы по методам расчета характеристик рассеяния антенн, формулируется цель и задачи диссертации. Актуальность темы диссертации обусловлена тем, что поле рассеяния антенн является существенным демаскирующим фактором объекта, на котором расположены антенны. Это обстоятельство существенно облегчает ведение радиолокационной разведки объектов военной техники и других объектов и их последующее уничтожение даже в том случае, когда антенны этих объектов не излучают в пространство. Кроме того, поле рассеяния антенн, расположенных в группе, существенно ухудшает электромагнитную обстановку в ближней зоне антенн, с точки зрения электромагнитной совместимости, ухудшает параметры антенн в режимах приема и передачи.

Анализу рассеивающих свойств антенн посвящен ряд работ. В большинстве известных работ поле рассеяния антенн и эффективная площадь рассеяния, представляются в виде двух составляющих антенной и структурной. Антенная составляющая легко определяется по известным характеристикам антенны в режиме передачи. Общие методы расчета структурной составляющей поля рассеяния и ЭПР для антенны с произвольной геометрией не разработаны. В некоторых работах поле рассеяния представляется в виде антенной, теневой, модовой и конструктивной составляющих. Однако методы расчета модовой и конструктивной составляющих не разработаны, и их нельзя выразить через характеристики и параметры антенны в режиме передачи.

Характеристики рассеяния антенны необходимо анализировать, решая внутреннюю задачу теории антенн – определение распределения тока в элементах антенны по заданному способу возбуждения. Для проволочных антенн естественным методом решения этой задачи является метод интегральных уравнений в тонкопроволочном приближении. Этот метод позволяет решать задачу определения распределения тока в проводниках антенны, наводимого облучающей электромагнитной волной, достаточно точно. Методом интегральных уравнений в известных работах рассмотрены характеристики и параметры антенны в режиме рассеяния для простейших излучателей – прямолинейного провода заданной длины и для кольцевой рамки, а также для радиолокационных объектов при аппроксимации их поверхности проволочной сеткой. Этот метод применим для анализа характеристик рассеяния в резонансной области, когда общая длина проводников, аппроксимирующих объект не превосходит нескольких десятков длин волн.

Многоэлементные антенные решетки вибраторных и рамочных антенн, которые являются объектом исследования, не принадлежат к таким объектам. Их волновые размеры существенно превосходят длину волны. Поэтому поставлена задача разработки метода численного анализа характеристик рассеяния многоэлементных антенных решеток проволочных излучателей, основанного на методе интегральных уравнений.

Анализ научно-технической литературы показывает, что не исследованы характеристики рассеяния директорных и рамочных антенн и решеток из таких антенн. На основании этого анализа сформулированы задачи диссертационной работы:

- исследование соотношения между структурной, антенной и полной ЭПР антенн;

- разработка метода расчета характеристик рассеяния многоэлементных антенных решеток;

- разработка математических моделей вибраторных и рамочных антенн и решеток из таких антенн в режиме рассеяния;

- исследование закономерностей рассеяния электромагнитной волны широко применяемыми в радиолокационной и связной технике вибраторными и рамочными антеннами и решетками из таких антенн.

Во второй главе излагаются результаты разработки математической модели многоэлементной антенной решетки проволочных излучателей, основанной на методе интегральных уравнений (ИУ). Используется интегральное уравнение Поплингтона

$$\int_0^L I(l_q) Z(l_p, l_q) dl_q = U(l_p), \quad (1)$$

где

$I(l_q)$  – искомый ток, текущий в проводнике под воздействием электромагнитной волны, возбуждающей проводник;

$L$  – длина проводника;

$Z(l_p, l_q)$  – ядро интегрального уравнения.

Правая часть зависит от распределения стороннего поля, возбуждающего проводник:

$$U(l_p) = -i \frac{1}{k} (\vec{E}_{cm}(l_p), \vec{l}_0). \quad (2)$$

Интегральное уравнение сводится к системе линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) порядка  $M$  с использованием импульсных функций в качестве базисных и весовых. Значение  $M$  равно числу сегментов, на которые разбиваются все проводники антенны при сведении ИУ к СЛАУ.

Рассмотрена задача облучения антенны плоской электромагнитной волной, распространяющейся в системе координат  $X, Y, Z$  ( $R, \theta, \varphi$ ) в направлении  $\theta_i, \varphi_i$ . Для этого случая получено выражение для правой части ИУ (2).

Разработаны математические модели, основанные на методе ИУ и описывающие три типа антенн: директорной антенны со сложным рефлектором (рисунок 1), двойной рамочной антенны из замкнутых волновых рамок (рисунок 2,а) и двойной рамочной антенны из разомкнутых двухволновых рамок (рисунок 2,б) и плоской решетки из таких антенн с числом столбцов  $M_x$ , числом строк  $M_y$ .



Рисунок 1 – Директорная антенна

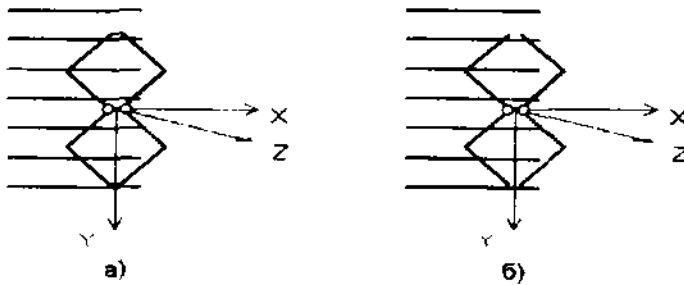


Рисунок 2 – Двойная рамочная антенна из замкнутых волновых рамок (а) и двойная рамочная антенна из разомкнутых двухволновых рамок (б)

Диаграмма рассеяния определяется по полю рассеяния, которое определяется по току в проводниках антенны методом векторного потенциала. ЭПР ( $S$ ) рассчитывается с использованием известного выражения

$$S = 4\pi R^2 \left| \frac{E}{E_i} \right|^2, \quad (3)$$

где  $E$  – поле рассеяния,  $E_i$  – поле облучающей волны,  $R$  – расстояние до точки наблюдения в дальней зоне.

Разработанные модели позволяют анализировать численно характеристики рассеяния антенных решеток при числе сегментов  $M < 10000$ . Так, в решетке из 12 директорных антенн, в каждой из которых 5 директоров и линейный рефлектор, число сегментов  $M = 7000$ , а время решения задачи составляет 3 часа на персональном компьютере с тактовой частотой 2,66 ГГц. Это время, в основном, расходуется на вычисление коэффициентов матрицы СЛАУ и решение СЛАУ. Известно, что время решения СЛАУ пропорционально  $M^3$ , поэтому метод ИУ для всей решетки применим при относительно небольшом числе излучателей.

Для численного моделирования многоэлементных антенных решеток предложен метод, основанный на методе ИУ и известном методе определения ЭПР сложных радиолокационных объектов. В соответствии с этим методом ЭПР сложного объекта ( $S$ ), составленного из  $N$  простых объектов, может быть определена с помощью следующего приближенного выражения, не учитывающего переизлучения облучающей электромагнитной волны между простыми объектами:

$$S = \left| \sum_{n=1}^N \sqrt{S_n} e^{i\psi_n} \right|^2, \quad (4)$$

где  $S_n$  – ЭПР простого объекта и номером « $n$ »,  $\psi_n$  – фаза рассеянного поля этого объекта.

В диссертации предлагается метод численного моделирования характеристик рассеяния многоэлементных антенных решеток, заключающийся в следующем. Вся решетка делится на  $N_p = N_{px} \cdot N_{py}$  одинаковые подрешетки



(фрагменты), где  $N_{px}$ ,  $N_{py}$  – число фрагментов по осям X, Y. Для каждой подрешетки задача определения ДР и ЭПР решается методом ИУ. При этом для одной подрешетки определяются  $S_n$ ,  $\Psi_n$  и диаграмма рассеяния  $F_{ps}(\theta, \varphi)$ . Для всей решетки ЭПР определяется по формуле (6), ненормированная диаграмма рассеяния  $f_s(\theta, \varphi)$  – по формуле

$$f_s(\theta, \varphi) = F_{ps}(\theta, \varphi) \cdot F_c(\theta, \varphi), \quad (5)$$

где

$F_c(\theta, \varphi)$  – множитель системы подрешеток.

При распространении облучающей ЭМВ по нормали к плоскости решетки ЭПР максимальна и равна  $S_{max}$ . Зависимость ЭПР от угловых координат точки наблюдения определяется формулой

$$S(\theta, \varphi) = S_{max} F_s^2(\theta, \varphi), \quad (6)$$

где  $F_s(\theta, \varphi)$  – нормированная диаграмма рассеяния.

Точность вычисления ЭПР и ДР по выше приведенным формулам оценивалась путем сравнения результатов расчета ЭПР и ДР с применением метода ИУ для всей решетки и с применением метода фрагментации при различном числе излучателей в одном фрагменте и сохранении общего числа излучателей в решетке. Такое сравнение возможно было провести для решеток с таким числом излучателей, при котором возможно применение метода ИУ для всей решетки.

Аналитические выражения, описывающие геометрию решеток вибраторных (директорных) и рамочных антенн; матрицу коэффициентов СЛАУ при облучении решетки плоской электромагнитной волной, распространяющейся в заданном направлении и имеющей заданную поляризацию; поле рассеяния; ЭПР одного фрагмента; выше приведенные выражения для ДР и ЭПР решетки при ее делении на подрешетки составляют математическую модель рассматриваемой задачи численного моделирования характеристик рассеяния многоэлементной антенной решетки.

В третьей главе анализируются характеристики рассеяния вибраторных (директорных) антенн и антенных решеток из таких антенн. Проведен подробный численный анализ характеристик рассеяния директорной антенны при различных геометрических параметрах и облучении антенны под различными углами к оси антенны. Моделирование выполнено в диапазоне частот со средней частотой  $f_0 = 300$  МГц. Выбор такой средней частоты не принципиален. Многие результаты, полученные в диссертации, приведены для нормированной частоты  $f/f_0$  и могут быть пересчитаны на другую среднюю частоту. Рисунки 3 и 4 иллюстрируют различие в диаграмме направленности и диаграмме рассеяния директорной антенны с числом директоров  $Nd=5$ . Диаграммы направленности показаны в плоскостях E и H, диаграммы рассеяния – в плоскости H. На рисунках с диаграммами рассеяния показано направление распространения облучающей электромагнитной волны и зна-

чение ЭПР в максимуме ДР, нормированное к квадрату длины волны (длина волны обозначена символом  $L_0$ )

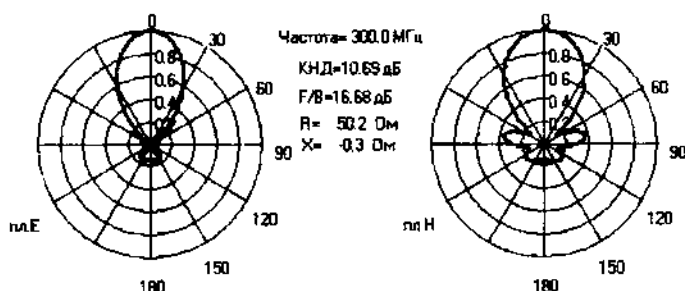


Рисунок 3 – Диаграмма направленности директорной антенны

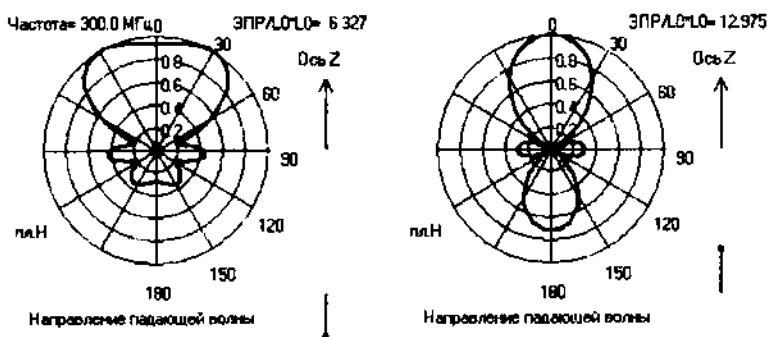


Рисунок 4 – Диаграмма рассеяния директорной антенны

Проведенный анализ показал, что максимум ДР ориентирован вдоль системы директоров независимо от направления облучения, если электромагнитная волна распространяется вдоль оси антенны. Значение ЭПР растет с ростом  $Nd$ . На рисунке 5 показана зависимость абсолютного значения ЭПР от нормированной частоты при разном числе директоров. На входе антенны - короткое замыкание, рабочая частота 300 МГц. Как видно, максимальное значение ЭПР наблюдается на средней частоте рабочего диапазона режима излучения. Следовательно, принимать меры по снижению ЭПР необходимо в рабочем диапазоне частот антенны. Одним из способов снижения ЭПР является согласование антенны с линией передачи. Проведен подробный численный анализ ЭПР и ДР линейной и плоской антенных решеток вибраторных антенны и сравнение результатов, полученных методом ИУ для всей антенны и с использованием предлагаемого метода фрагментации решетки.

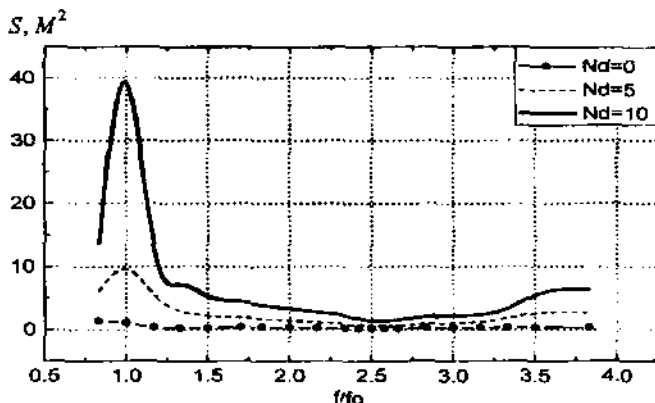


Рисунок 5 – Зависимость ЭПР директорной антенны от нормированной частоты

Рассмотрены E-плоскостная, H-плоскостная решетки и плоская решетка с прямоугольной сеткой расположения излучателей. Исследовано соотношение между структурной и антенной составляющими ЭПР и показано, что сумма антенной и структурной составляющих близка к полной ЭПР, следовательно, при согласовании излучателей с линией передачи ЭПР решетки уменьшается примерно в 2 раза. На рисунке 6 показана зависимость этих составляющих от числа излучателей в линейной E-плоскостной решетке, в которой излучатель – полуволновой резонансный вибратор с линейным рефлектором. Результат получен методом ИУ для всей решетки.

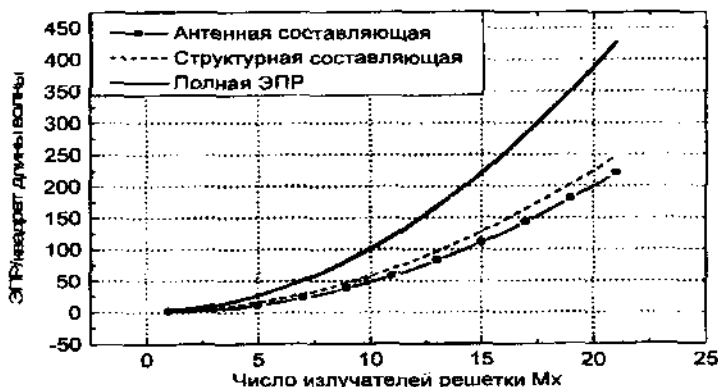


Рисунок 6 – Зависимость ЭПР/λ² от числа излучателей в решетке

Показано, что в линейной и плоской антенных решетках значения ЭПР, рассчитанные двумя выше описанными методами различаются незначительно (не более, чем на 10%), если число излучателей в одном фрагменте  $N_{\phi} > 5$ . Сказанное иллюстрируется рисунком 7, на котором показана зависимость

ЭПР/λ<sup>2</sup> от числа излучателей в линейной Е-плоскостной решетке при числе излучателей в одном фрагменте N<sub>φ</sub>=5.

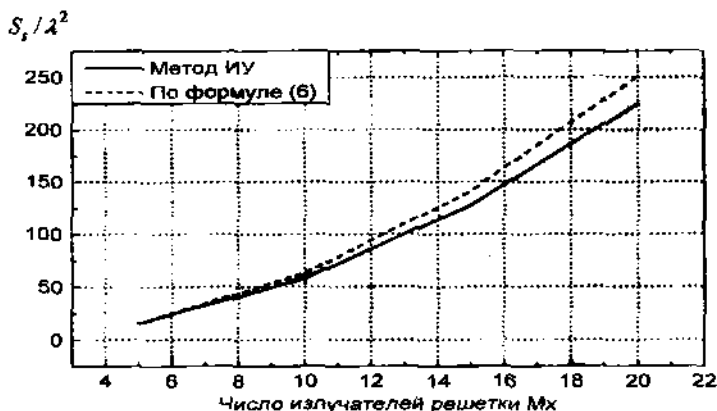


Рисунок 7— Зависимость ЭПР/λ<sup>2</sup> от числа излучателей в решетке

Ошибка в расчете диаграммы рассеяния при использовании фрагментации еще меньше. Для иллюстрации точности расчета с использованием фрагментации решетки на рисунках 8, 9 показаны нормированные диаграммы рассеяния с числом излучателей в решетке Mx=10, с числом излучателей в одном фрагменте N<sub>φ</sub>=5. Расчет произведен методом ИУ для всей решетки и при использовании фрагментации для двух углов облучения θ<sub>i</sub> (θ<sub>i</sub> - угол между направлением распространения электромагнитной волны и нормалью к плоскости решетки, значение θ<sub>i</sub>=0 соответствует распространению по нормали к решетке). При этом диаграмма рассеяния одного фрагмента рассчитывалась методом ИУ. При θ<sub>i</sub>=0 на рисунке 8 обе кривые практически совпадают. При θ<sub>i</sub>=20° расхождения более заметные (рисунок 9), однако вполне приемлемые для инженерных расчетов.

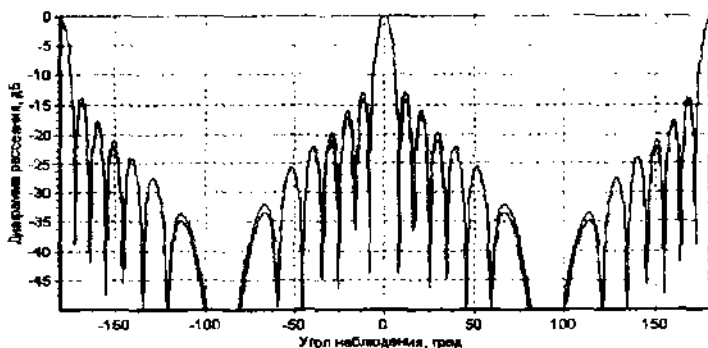


Рисунок 8 – Диаграмма рассеяния (θ<sub>i</sub>=0)

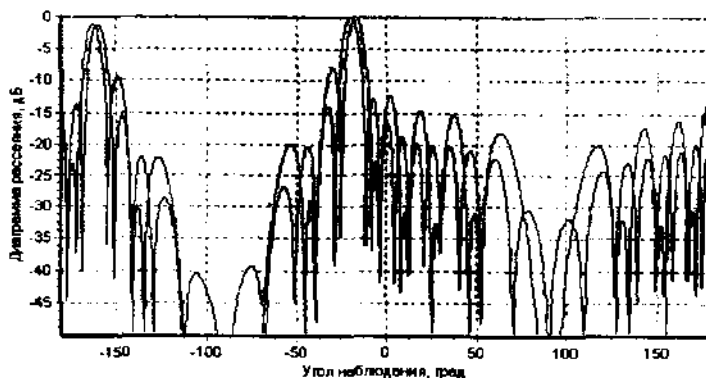


Рисунок 9 – Диаграмма рассеяния ( $\theta_i=20^\circ$ )

Аналогичные результаты получены для Н-плоскостной и плоской антенных решеток.

Проведенный численный анализ позволяет сделать вывод: предложенный метод анализа характеристик рассеяния многоэлементных антенных решеток вибраторных излучателей позволяет рассчитать ЭПР и ДР с достаточно высокой точностью при любом числе излучателей в решетке, если в одном фрагменте не менее 5 излучателей, что вполне приемлемо для метода ИУ даже при большом числе директоров в одном излучателе - директорной антенне.

В четвертой главе излагаются результаты численного исследования характеристик рассеяния двух типов рамочных антенн -- рисунок 2 и антенных решеток рамочных антенн. Каждый тип рамочной антенны имеет достоинства и недостатки по сравнению друг с другом. Проведено подробное численное моделирование характеристик рассеяния рамочных антенн при различных геометрических параметрах в широком диапазоне частот. Исследована диаграмма рассеяния при различных направлениях облучения рамки плоской электромагнитной волной; структурная, антенная составляющие и полная эффективная площадь рассеяния.

Результаты численного моделирования позволяют сделать следующие выводы:

- При распространении облучающей волны навстречу оси антенны ( $\theta_i=180^\circ$ ) и согласованной нагрузке на входе антенны максимум ДР ориентирован по направлению распространения облучающей волны. При этом однопозиционная ЭПР на порядок меньше, чем ЭПР «на просвет».

- При коротком замыкании входа антенны,  $\theta_i=180^\circ$  и  $\theta_i=0$  рассеянное поле в прямом и обратном направлениях практически одинаково.

- Направление максимума ДР в плоскостях Е и Н в рабочем диапазоне частот режима излучения практически не зависит от угла  $\theta_i$ .

- В максимуме ДР на средней частоте рабочего диапазона структурная и антенная составляющие ЭПР близки друг к другу. На частоте  $f \approx 0,8 f_0$

структурная составляющая существенно превосходит антенную составляющую и полную ЭПР. Этот результат означает, что радиотехническая разведка рамочных антенн по их полю рассеяния наиболее эффективна в рабочем диапазоне частот режима излучения. Для иллюстрации на рисунке 10 показана зависимость структурной составляющей ЭПР рамочной антенны типа рисунок 2,а, нормированная к площади рефлектора (S), от нормированной частоты.

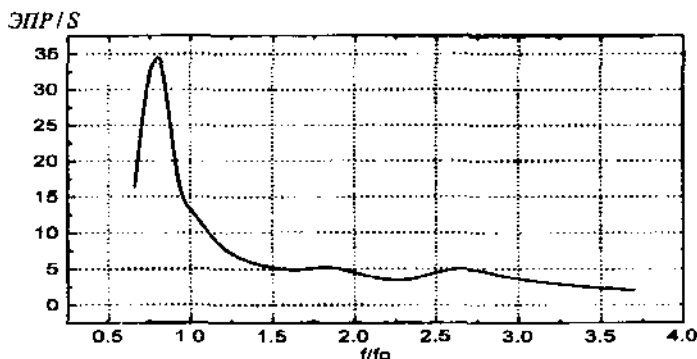


Рисунок 10 – ЭПР/S рамочной антенны в диапазоне частот

Проведено сравнение ЭПР директорной и рамочной антенн из волновых рамок для случая, когда коэффициент (G) усиления обоих типов антенн одинаков. На рисунке 11 показаны характеристики рассеяния при облучении антенн навстречу оси, приведены значения структурной составляющей однопозиционной ЭПР.

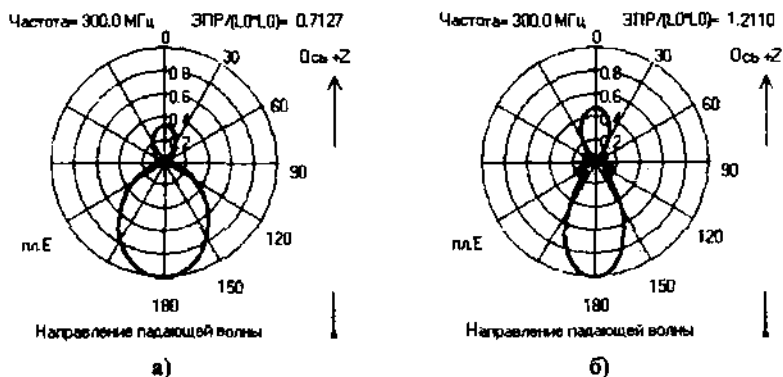


Рисунок 11 – Характеристики рассеяния рамочной антенны (а) и директорной антенны (б)

Из полученных результатов следует, что при облучении антенн навстречу оси антенн однопозиционная ЭПР рамочной антенны меньше, так как максимум диаграммы рассеяния ориентирован по направлению распро-

странения облучающей волны. При облучении антенн вдоль оси однопозиционная ЭПР рамочной антенны больше ЭПР директорной антенны из-за большей площади рефлектора.

Численное моделирование линейных и плоской антенных решеток рамочных излучателей типа рисунок 2,а показало, что предложенный метод расчета ЭПР и ДР с разделением решетки на фрагменты позволяет рассчитать характеристики рассеяния многоэлементных антенных решеток рамочных антенн с небольшой погрешностью по сравнению с методом ИУ для всей решетки. Для иллюстрации на графиках рисунков 12, 13 показаны результаты расчета структурной составляющей ЭПР ( $S_s$ ), нормированной к  $\lambda^2$ , в зависимости от числа излучателей при разном числе излучателей в одном фрагменте  $N_\phi$ .

Такая же незначительная ошибка получается при расчете диаграммы рассеяния. На рисунке 14 показаны результаты расчета ДР с применением метода ИУ ко всей линейной решетке с числом излучателей  $Mx=6$  (пунктирной линией) и с применением предложенного метода фрагментации (непрерывной линией) при двух значениях числа излучателей в одном фрагменте. Решетка облучается волной с направления главного максимума диаграммы направленности в режиме излучения. Максимум ДР ориентирован по направлению распространения волны.

$$S_s / \lambda^2$$

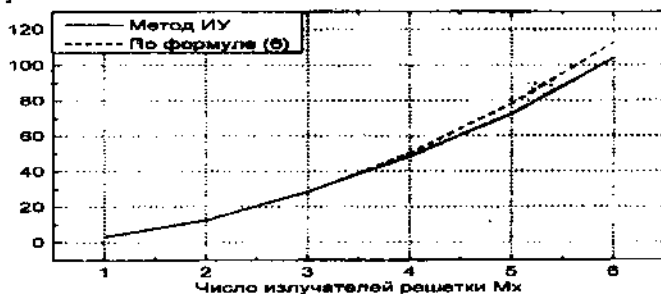


Рисунок 12 – Зависимость ЭПР от числа излучателей ( $N_\phi=1$ )

$$S_s / \lambda^2$$

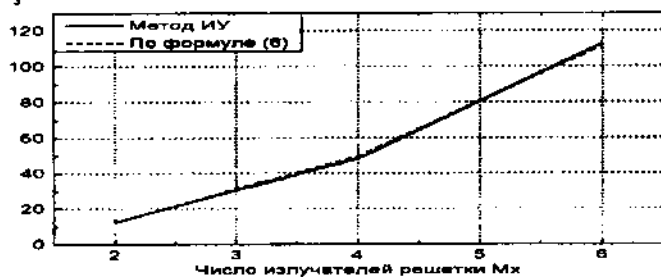
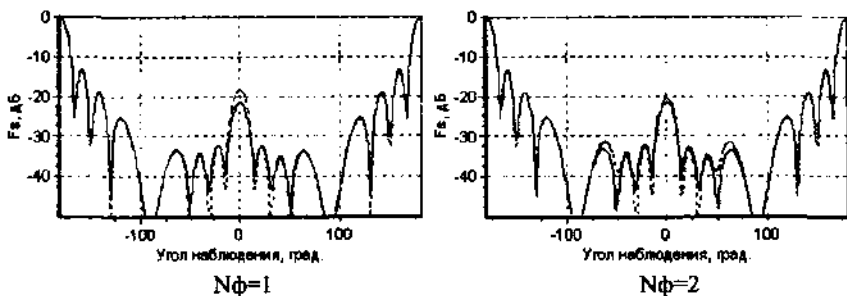


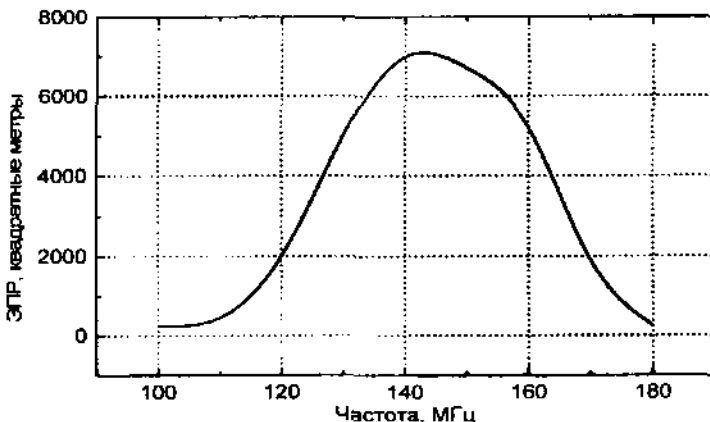
Рисунок 13 – Зависимость ЭПР от числа излучателей ( $N_\phi=2$ )



**Рисунок 14 – Диаграмма рассеяния антенной решетки рамочных антенн**

В пятой главе излагаются результаты исследования характеристик рассеяния антенной решетки радиолокатора метрового диапазона «П-18», стоящего на вооружении войск ПВО Сирии и новой РЛС «Восток», разработанной в Республике Беларусь (ГУП «КБ Радар»). Эта задача решалась как прикладная с целью продемонстрировать возможности разработанной математической модели антенной решетки и реализующего ее программного обеспечения и с целью получения сведений о характеристиках рассеяния антенн «П-18» и «Восток», так как они неизвестны.

Антенная система РЛС П-18 состоит из шестнадцати директорных антенн, расположенных в два этажа. КНД одного изолированного излучателя равен 10 дБ. Проведен численный анализ характеристик излучения и характеристик рассеяния одного излучателя и антенной системы РЛС «П-18» в рабочем диапазоне частот. Для всей антенной решетки характеристики излучения и рассеяния рассчитывались с учетом и без учета подстилающей поверхности. Исследована зависимость ЭПР от частоты. На рисунке 16 показана зависимость от частоты структурной составляющей однопозиционной ЭПР<sup>2</sup>.



**Рисунок 15 – Зависимость структурной составляющей ЭПР от частоты**



Как видно, ЭПР достигает максимума в рабочей полосе частот режима излучения и имеет очень большое значение, что облегчает радиолокационную разведку РЛС «П-18».

Сравнительный анализ результатов исследования характеристик рассеяния антенн двух РЛС показал, что:

1. При облучении антенны с переднего полупространства однопозиционная ЭПР антенны РЛС «Восток» на средней частоте и на частотах, больших средней, меньше, чем РЛС «П-18».

2. При облучении антенны с переднего полупространства однопозиционная ЭПР антенны РЛС «Восток» на частотах, меньших средней, больше, чем РЛС «П-18».

3. При облучении с любого направления среднее по углам значение ЭПР антенны РЛС «Восток» на средней частоте меньше, чем антенны РЛС «П-18».

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Основные научные результаты диссертации

1. На основе анализа источников научно-технической информации обоснована актуальность исследования характеристик рассеяния антенн, с точки зрения решения задач защиты антенных систем от радиолокационной разведки и решения проблем электромагнитной совместимости.

2. Обосновано применение метода интегральных уравнений при исследовании рассеивающих свойств антенн и метода сложных радиолокационных объектов для расширения возможности метода интегральных уравнений при исследовании характеристик рассеяния многоэлементных антенных решеток [2-А].

3. На основе метода интегральных уравнений разработаны математические модели антенн в режиме рассеяния:

- директорной антенны [1-А, 4-А, 7-А, 8-А, 12-А];
- рамочных антенн двух типов [5-А, 6-А, 10-А, 12-А];
- антенных решеток директорных и рамочных антенн [2-А, 3-А, 11-А, 13-А]

4. Впервые путем численного моделирования исследованы характеристики рассеяния директорных и рамочных антенн и антенных решеток из таких антенн [1-А –13-А].

5. Установлены основные закономерности в зависимости диаграммы рассеяния и эффективной площади рассеяния от геометрических параметров антенн и частоты. Показано, что:

- полная ЭПР может существенно отличаться от арифметической суммы структурной и антенной составляющих ЭПР [1-А, 4-А];

- при нагрузке входа антенны на согласованную нагрузку (обычный режим работы любой антенны) ЭПР антенны представляет собой структурную составляющую; эта составляющая имеет максимум в рабочем диапазоне частот антенны в режиме излучения, поэтому при разботке и эксплуатации антенн необходимо принимать меры по снижению ЭПР в рабочем диапазоне частот [4-А, 6-А, 7-А, 9-А–13-А];
- диаграмма рассеяния директорной и рамочной антенн слабо зависит от направления прихода облучающей электромагнитной волны [4-А, 6-А];
- максимум диаграммы рассеяния директорной антенны ориентирован вдоль оси антенны независимо от направления облучения [7-А];
- в антенной решетке директорных антенн максимум диаграммы рассеяния ориентирован в зеркальном направлении по отношению к нормали к плоскости решетки и направлению распространения облучающей волны [2-А];
- в рамочных антеннах с плоским рефлектором:
  - а) при распространении облучающей волны по нормали к плоскости рефлектора навстречу оси антенны максимум диаграммы рассеяния ориентирован в направлении распространения облучающей волны, т.е. ЭПР «на проход» больше однопозиционной ЭПР [6-А, 9-А];
  - б) при распространении облучающей волны по нормали к плоскости рефлектора вдоль оси антенны максимум диаграммы рассеяния ориентирован навстречу распространения облучающей волны, т.е. ЭПР «на проход» меньше однопозиционной ЭПР [6-А, 9-А];
- в антенных решетках рамочных антенн в диаграмме рассеяния появляются два максимума – в зеркальном направлении по отношению к направлению распространению облучающей волны и в обратном направлении [6-А];

6. Показано, что метод сложных радиолокационных объектов применительно к антенным решеткам позволяет существенно расширить возможности метода интегральных уравнений, с точки зрения анализа характеристик рассеяния при большой волновой длине проводников антенны. Число излучателей, по существу, не ограничено, фрагмент антенны может включать от 1 до 10 излучателей. Это позволяет достаточно точно рассчитать диаграмму рассеяния и эффективную площадь рассеяния [2-А, 11-А, 13-А].

7. Исследована диаграмма рассеяния и эффективная площадь рассеяния РЛС метрового диапазона «П-18» и «Восток».

8. Основные результаты работы:

опубликованы в 6 статьях научных журналах, в 7 статьях сборников материалов научных конференций;  
 доложены на 6 международных конференциях.

## Рекомендации по практическому использованию результатов

Поученные результаты численного исследования характеристик рассеяния вибраторных, директорных, рамочных антенн и решеток из таких антенн позволяют:

1. Оценить радиолокационную заметность антенн радиотехнических систем метрового и дециметрового диапазонов волн, находящихся в эксплуатации, в том числе военного назначения.

2. Обоснованно выбрать тип антенны при проектировании радиолокационных, навигационных систем, систем связи, ориентируясь на требования по радиолокационной заметности.

Предложенный метод численного анализа характеристик рассеяния антенных решеток проволочных излучателей, разработанная математическая модель такой решетки может быть использовано при разработке математических моделей антенных решеток других типов проволочных излучателей – спиральных, логопериодических и т.д.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Статьи

1-А Характеристики рассеяния директорной антенны / О.А. Юрцев, А. Аль-Рифаи, В.В. Носков, А.В. Барцевич // Вестник Военной академии Республики Беларусь. – Минск, 2006. – № 2(11). – С.42–46.

2-А Юрцев, О.А. Эффективная площадь рассеяния многоэлементных линейных антенных решеток вибраторных антенн / О.А. Юрцев, А. Аль-Рифаи, Ю.Ю. Бобков // Доклады БГУИР. – 2006. – №3(15). – С.44–47.

3-А Юрцев, О.А. Характеристики рассеяния малоэлементных линейных антенных решеток директорных антенн / О.А. Юрцев, А. Аль-Рифаи, Ю.Ю. Бобков // Доклады БГУИР. – 2007. – №1(17). – С.18–22.

4-А Аль-Рифаи, А. Эффективная площадь рассеяния вибраторных антенн в широкой полосе частот / А. Аль-Рифаи // Доклады БГУИР. – 2007. – № 2(18). – С.59–63.

5-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.

6-А Аль-Рифаи, А. Характеристики рассеяния рамочных антенн в широкой полосе частот / А. Аль-Рифаи, О.А. Юрцев // Доклады БГУИР. – 2007. – № 4 (20). – С.13–18.

### Материалы конференций

7-А Аль-Рифаи, А. Характеристики рассеяния директорных антенн / А. Аль-Рифаи, А.В. Барцевич // Молодежь и современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций РТ-2006: Материалы 2-й Международной молодежной научно-технической конференции студентов, аспирантов и ученых., Севастополь, 17-21 апреля 2006 г. – С. 67.

8-А Юрцев, О.А. Взаимодействие директорных антенн в составе антенной решетки. / О.А. Юрцев, Ю.Ю. Бобков, С.А. Чекан, А. Аль-Рифаи // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии Крымико-2006: Материалы 16-ой Международной Крымской конференции. Крым, 11-15 сентября 2006г. – Том 2. – С. 435–436.

9-А Аль-Рифаи, А. Характеристики рассеяния рамочных антенн. / А. Аль-Рифаи, О.А. Юрцев // Физика и технические приложения волновых процессов: Материалы V Международной научно-технической конференции. Самара, 11-17 сентября 2006 г. – С. 182–184.

10-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 научно-технической конференции. Самара, 11-17 сентября 2006 г. – С.181–182.

11-А Yurtsev, O.A. Radar Cross Section of multielement linear dipole antenna array. / Yurtsev O.A., Bobkov Y.Y., Alrifai A // Mathematical methods in electromagnetic theory MMET 2006: 11-th International Conference. Kharkov, 27-30 June 2006. – P.173–175.

12-А Аль-Рифаи, А. Сравнительный анализ характеристик рассеяния директорных и рамочных антенн. / А. Аль-Рифаи // Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций РТ-2007: Материалы 3-й Международной молодежной научно-технической конференции. Севастополь 16-21 апреля 2007 г. – С. 96.

13-А Bartsevich, A.V. Multi-element wire antenna array scattering characteristics numerical modeling. / Bartsevich A.V., Bobkov Y.Y., Al Rifay A., Yurtsev O.A. // 6-th International Conference on Antenna Theory and Techniques, Sevastopol, 17-21 September 2007. – P. 432- 434.

## РЭЗІЮМЭ

Абдальмуін Ахмед Аль-Рыфаі

### ЛІКАВАЕ МАДЭЛЯВАННЕ ХАРАКТАРЫСТЫК РАССЕЙВАННЯ АН-ТЭННЫХ РАШОТАК ВІБРАТАРНЫХ І РАМАЧНЫХ АНТЭН

Ключавыя словы: антэнная рашотка, вібратарныя і рамачныя антэны, дыяграма рассейвання, эфектыўная плошча рассейвання, метады інтэгральных ураўненняў.

Мэтай працы з'яўлялася распрацоўка эфектыўнага метаду лікавага аналізу рассейвальных уласцівасцяў антэнных рашотак драцяных выпраменьвальнікаў, якія дазваляюць з высокай дакладнасцю мадэляваць дыяграму рассейвання (ДР) і эфектыўную плошчу рассейвання (ЭПР) без абмежаванняў на хвалевыя памеры рашоткі.

Распрацаваны метады заснаваны на ўжыванні інтэгральнага ураўнення для току ў тонкіх правадырах і дазваляе разлічваць характарыстыкі рассейвання антэнных рашотак драцяных выпраменьвальнікаў без абмежавання ліку выпраменьвальнікаў у рашотцы. Пры гэтым інтэгральнае ураўненне ўжываецца да фрагмента рашоткі, што забяспечвае высокую дакладнасць азначэння характарыстык рассейвання, уласцівую метаду інтэгральных ураўненняў. З выкарыстаннем прапанаванага метаду распрацавана матэматычная мадэль антэннай рашоткі вібратарных і рамачных выпраменьвальнікаў у рэжыме рассейвання і праграмае забеспячэнне, якое рэалізуе матэматычную мадэль. Праграма лікавага мадэлявання пратэставана шляхам рашэння тэставых задач і параўнаннем вынікаў разліку і эксперыменту.

Лікава даследаваны характарыстыкі рассейвання вібратарных (дырэктарных) і рамачных антэн і антэнных рашотак з такіх антэн у шырокім інтэрвале змены геаметрычных параметраў і частаты. Паказана, што ЭПР дырэктарных і рамачных антэн дасягае максімуму ў дыяпазоне частот, які адпавядае працоўнаму дыяпазону рэжыму выпраменьвання. Даследаваны суадносіны паміж поўнай ЭПР і яе складнікамі - структурнай і антэннай, залежнасць ДР і ЭПР ад кірунку прыходу апраменьвальнай электрамагнітнай хвалі. Паказана, што:

поўная ЭПР не роўная, у агульным выпадку, арыфметычнай суме антэннай і структурнай складнікаў;

сярэдня ЭПР рамачных антэн менш, чым дырэктарных антэн;

адным з спосабаў памяншэння радыёлакацыйнай прыкметнасці дырэктарных і рамачных антэн з'яўляецца іх узгадненне з лініяй перадачы.

З выкарыстаннем распрацаванага праграмага забеспячэння даследаваны характарыстыкі рассейвання антэнных сістэм радыёлакатараў метравага дыяпазону "П-18" і "Усход". Паказана, што сярэдняя ЭПР антэны РЛС "Усход" менш, чым сярэдняя ЭПР антэны РЛС "П-18".

## РЕЗЮМЕ

Абдильмуин Ахмед Аль-Рифаи

### ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК РАССЕЯНИЯ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК ВИБРАТОРНЫХ И РАМОЧНЫХ АНТЕНН

*Ключевые слова:* антенная решетка, вибраторные и рамочные антенны, диаграмма рассеяния, эффективная площадь рассеяния, метод интегральных уравнений.

Целью работы являлась разработка эффективного метода численного анализа рассеивающих свойств антенных решеток проволочных излучателей, позволяющего с высокой точностью моделировать диаграмму рассеяния (ДР) и эффективную площадь рассеяния (ЭПР) без ограничений на волновые размеры решетки.

Разработанный метод основан на применении интегрального уравнения для тока в тонких проводниках и позволяет рассчитывать характеристики рассеяния антенных решеток проволочных излучателей без ограничения числа излучателей в решетке. При этом интегральное уравнение применяется к фрагменту решетки, что обеспечивает высокую точность определения характеристик рассеяния, присущую методу интегральных уравнений. С использованием предложенного метода разработана математическая модель антенной решетки вибраторных и рамочных излучателей в режиме рассеяния и программное обеспечение, реализующее математическую модель. Программа численного моделирования протестирована путем решения тестовых задач и сравнением результатов расчета и эксперимента.

Численно исследованы характеристики рассеяния вибраторных (директорных) и рамочных антенн и антенных решеток из таких антенн в широком интервале изменения геометрических параметров и частоты. Показано, что ЭПР директорных и рамочных антенн достигает максимума в диапазоне частот, соответствующем рабочему диапазону режима излучения. Исследовано соотношение между полной ЭПР и ее составляющими – структурной и антенной, зависимость ДР и ЭПР от направления прихода облучающей электромагнитной волны. Показано, что:

полная ЭПР не равна, в общем случае, арифметической сумме антенной и структурной составляющих;

средняя ЭПР рамочных антенн меньше, чем директорных антенн;

одним из способов уменьшения радиолокационной заметности директорных и рамочных антенн является их согласование с линией передачи.

С использованием разработанного программного обеспечения исследованы характеристики рассеяния антенных систем радиолокаторов метрового диапазона «П-18» и «Восток». Показано, что средняя ЭПР антенны РЛС «Восток» меньше, чем средняя ЭПР антенны РЛС «П-18».

## SUMMARY

Abdoul Mouen Ahmad Alrifai

### NUMERICAL SIMULATION OF SCATTERING CHARACTERISTICS OF DIPOL-LIKE AND THE LOOP-LIKE ANTENNAS ARRAYS

**Keywords:** antenna array, dipole-like and loop-like antennas, scattering diagram, Radar Cross Section (RCS), integral equations method.

The purpose of the work was to develop of efficient method for numerical analysis of thin wire antenna arrays scattering properties allowing to scattering diagram (SD) to and the Radar Cross Section (RCS) simulate a high precision without wavelength size limitation of arrays.

The developed methods is based on integral equations for currents in thin wire and allow to calculates of scattering characteristics of thin wire antenna arrays without limitation of irradiators number in antenna array. At that the integral equation is applies to antenna array fragment, that it provides high accuracy of scattering characteristics calculation, inherent in to integral equations method. The mathematical models of the dipole-like and loop-like thin wire antenna arrays in scattering mode was developed using the proposed method. The software realizing these models was developed too. The numerical simulation software was verified by test tasks solving and experiment.

The scattering characteristics of dipole-like (Yagi-Uda) and loop-like antennas and antenna arrays of such antennas were numerically investigated in wide range of geometric parameters and frequencies. Show that the RCS Yagi-Uda and loop-like antennas has maximums in the frequency range corresponding to the working range of radiation mode. The relationships between full RCS and its structural and antenna components were studied. The scattering diagram and RCS vs. directions of electromagnetic waves illumination were studied too.

Shown that:

- full RCS is not equal, in general case, antenna and structural components arithmetic sum;
- the average RCS for loop-like antennas smaller than it for Yagi-Uda antennas;
- one way of reduction of radar visibility Yagi-Uda and loop antennas is their matching with feeders.

Scattering characteristics of antenna systems of meter range radar "P-18"<sup>TM</sup> and "East"<sup>TM</sup> were simulated using developed software. In the work shown that the average RCS of radar "East"<sup>TM</sup> antenna less than the average RCS of radar "P-18"<sup>TM</sup> antenna.

*Научное издание*

Абдильмуин Ахмед Аль-Рифаи

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК РАССЕЯНИЯ  
АНТЕННЫХ РЕШЕТОК ВИБРАТОРНЫХ И РАМОЧНЫХ АНТЕНН**

специальность 01.04.03 «Радиофизика»

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

---

Подписано в печать	28.11.2007.	Формат 60x84 <sup>1</sup> / <sub>16</sub> .	Бумага офсетная.
Гарнитура «Таймс».	Печать ризографическая.		Усл. печ. л. 1,63.
Уч.-изд. л. 1,4.	Тираж 52 экз.		Заказ 696.

---

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. Бровка, 6.