

Учреждение образования  
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ»

УДК 621.396.67

**ДГАЛИ**

Мухамед Масуд Х.

**ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ И РАССЕЯНИЯ ЗЕРКАЛЬНЫХ  
АНТЕНН  
ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ И ОПТИМИЗАЦИЯ**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

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

Минск 2013

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

Научный руководитель

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

**Вилькоцкий Марат Антонович**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры информатики и основ электроники учреждения образования «Белорусский государственный педагогический университет» имени М. Танка.

**Калинин Александр Александрович**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры радиотехники учреждения образования «Военная академия Республики Беларусь».

Оппонирующая организация

ОАО «КБ Радар» – управляющая компания холдинга «Системы радиолокации».

Защита диссертации состоится « 30 » мая 2013 г. в 14.00 на заседании совета по защите диссертаций Д 02.15.02 при учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6, корп. 1, ауд. 232, тел.: 293-89-89, e-mail: dissovet@bsuir.by.

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

## КРАТКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Зеркальные антенны широко используются в различных областях радиотехники. В силу своей надежности, сравнительной простоты конструкции и высокого коэффициента полезного действия зеркальные антенны – основной тип остронаправленных антенн на космических аппаратах ближнего и дальнего космоса, в системах загоризонтной радиосвязи, использующих явление дальнего тропосферного распространения радиоволн, в спутниковом телевидении и других областях радиотехники.

На этапе проектирования основным методом оптимизации является численное моделирование. В настоящее время для решения этой задачи в области антенн и устройств СВЧ используются известные коммерческие программы общего назначения: HFSS, CST Microwave Studio, FEKO. Эти программы позволяют моделировать любые антенны, но требуют для использования больших компьютерных ресурсов. Время решения задачи определения электрических параметров однозеркальной антенны на одной частоте с диаметром рефлектора 40–50 длин волн и простым однорупорным облучателем измеряется десятками часов, что существенно затрудняет решение задачи оптимизации антенны путем перебора параметров. При большем диаметре и более сложном облучателе решение задачи анализа становится проблематичным. Кроме того, указанные программы общего назначения не позволяют определить некоторые параметры и зависимости, например, развязку между каналами многолучевой антенны в режиме приема. Поэтому актуальной является задача разработки математической модели, обеспечивающей численное моделирование зеркальных антенн, особенно при больших волновых диаметрах рефлектора, при существенно меньших требованиях к компьютерным ресурсам.

Диссертация посвящена разработке математической модели зеркальной антенны обобщенной конструкции и программного обеспечения, требующих существенно меньших компьютерных ресурсов по сравнению с наиболее популярными коммерческими программами электродинамического моделирования, и получению сведений о закономерностях в зеркальных антеннах, не описанных в литературе.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Связь работы с крупными научными программами (проектами) и темами**

Работа выполнялась в соответствии с контрактом № 07-1175 К (НИЧ БГУИР).

### **Цель и задачи исследования**

Целью диссертации является разработка эффективной математической модели, описывающей закономерности в зеркальных антеннах различных типов в режимах передачи, приема и рассеяния и обеспечивающей существенное уменьшение требований к компьютерным ресурсам при численном моделировании антенн по сравнению с коммерческими программами аналогичного назначения.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

1. Разработана математическая модель зеркальной антенны обобщенной конструкции, описывающая закономерности в режимах передачи, приема и рассеяния.

2. Произведена оценка преимуществ и недостатков разработанной специализированной программы по сравнению с известными коммерческими программами CST Microwave Studio, FHSS, FEKO.

3. Исследованы не описанные в литературе закономерности, характеризующие свойства однозеркальной и двухзеркальной антенн, с помощью разработанной математической модели и ее программной реализации.

*Объектом исследования* являются зеркальные антенны. *Предметом* – математическая модель и закономерности в режимах передачи, приема и рассеяния.

Выбор объекта и предмета исследования обусловлен широким использованием зеркальных антенн в радиотехнических системах, необходимостью использования специализированных программ для их численного моделирования, проектирования и оптимизации.

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

1. Математическая модель зеркальной антенны, основанная на методе физической оптики, интеграле Кирхгофа и теории возбуждения волноводов, отличающаяся возможностью моделирования поля зеркальных антенн во всех режимах, в ближней и дальней зонах, обеспечивающая численное моделирование зеркальной антенны с любым волновым диаметром рефлектора, сокращение требуемого объема оперативной памяти компьютера при моделирова-

нии в несколько раз и времени решения задачи на 1–3 прядка в зависимости от волнового диаметра рефлектора.

## 2. Новые, не описанные в литературе закономерности:

– распределение поля в ближней зоне антенны в режимах передачи и приема, позволяющие оценить коллимационные свойства зеркальной антенны, развязку между каналами в многолучевой антенне, экологическую обстановку вблизи антенны;

– особенности сканирования в зеркальной антенне с параболическим рефлектором типа «Оффсет», степень ухудшения возможности сканирования по сравнению с антенной с рефлектором полного профиля – сужение сектора сканирования в 2 раза при одних и тех же ограничениях на ухудшение электрических параметров антенны;

– зависимость развязки между каналами в многолучевой зеркальной антенне в режиме приема от геометрических параметров антенны и расстояния до точки фокусировки, позволяющие оптимизировать геометрию многолучевой антенны по критерию максимума коэффициента развязки;

– зависимость электрических характеристик двухзеркальной антенны с плоским контррефлектором от геометрических параметров, позволяющие оптимизировать антенну по коэффициенту направленного действия и уровню боковых лепестков при сканировании в диапазоне углов, превышающем сектор сканирования в однозеркальной антенне в 4–5 раз;

– влияние облучателя и формы рефлектора на рассеивающие свойства антенны.

## Личный вклад соискателя

Соискателем самостоятельно были получены все основные результаты численного моделирования зеркальных антенн различных типов с помощью двух программ: основанной на разработанной математической модели и коммерческой программы FEKO, проведено их сравнение и сделаны выводы. Подготовлены доклады и публикации, в которых нет соавторов.

Совместно с руководителем, д-р техн. наук, профессором О.А. Юрцевым разработаны математическая модель зеркальной антенны и программа численного моделирования, подготовлены совместные публикации и доклады.

## Апробация результатов диссертации

Результаты диссертационных исследований докладывались и обсуждались на следующих конференциях: 7-й Международной молодежной научно-технической конференции «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций РТ-2011», 11 – 15 апреля 2011 г., Севастополь, Украина. VIII Mezinarodni vedecko-praktika koference «Vedecky Pokrok na Prelomu

Тусыачалеты-2012», 27.05. – 05.06.2012. Прага. VIII Международной научно-практической конференции «Новината за напреднали наука – 2012», 17–25 мая 2012. София, «Бял ГРАД-БГ», ООД, 2012. 6<sup>th</sup> International Conference «Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals». 17–21 September, 2012, Sevastopol, Ukraine. 11<sup>th</sup> International Conference TCSET'2012. Lviv – Slavske, Ukraine, February 21–24, 2012. 1X Международной научно-практической конференции «Новейшие научные достижения – 2013», 17–25 марта 2013 г., София, «Бял ГРАД-БГ», ООД. 9-й Международной молодежной научно-технической конференции РТ-2013. 22–26 апреля 2013 г., Севастополь, Украина.

### **Опубликованность результатов диссертации**

По материалам диссертации опубликовано 12 научных работ, в том числе 4 статьи в научных рецензируемых журналах и сборниках, общим объемом 1,76 авторских листа, 8 публикаций в сборниках тезисов докладов и в материалах международных научно-технических конференций.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертационная работа состоит из перечня сокращений, введения, общей характеристики работы, четырех глав, заключения, библиографического списка и приложений.

В первой главе проведен аналитический обзор научной литературы по теме диссертационных исследований, сформулированы цель диссертации и основные задачи.

Во второй главе описана математическая модель обобщенной зеркальной антенны, основанная на методе физической оптики и теории возбуждения волноводов. Модель при численной ее реализации позволяет анализировать и оптимизировать по различным критериям одно- и двухзеркальные антенны с рефлекторами полного профиля и рефлекторами типа «Оффсет», анализировать поле антенн в любой зоне пространства в режиме передачи и приема, учитывать случайные ошибки профиля рефлекторов на характеристики антенн, анализировать характеристики рассеяния.

В третьей главе приводятся результаты анализа однозеркальной антенны – однолучевой и многолучевой в режимах передачи и приема при фокусировке антенны в дальнюю и ближнюю зоны. Новые результаты оформлены в виде графиков, отражающих закономерности, мало описанные или не описанные в литературе, знание которых облегчает проектирование антенны и ее оптимизацию.

В четвертой главе приводятся результаты численного анализа двухзеркальных антенн: двухзеркальной антенны Кассегрена и двухзеркальной антенны с плоским контррефлектором. Результаты моделирования, отражающие не описан-

ные в литературе закономерности, оформлены в виде графиков, удобных для использования при проектировании и оптимизации антенн.

Полный объем диссертационной работы составляет 118 страниц, из них 67 страниц текста, 117 рисунков на 43 страницах, 2 таблицы на 1 странице, 1 приложение на 1 странице, библиографический список из 60 наименований на 6 страницах, включая список публикаций автора из 12 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы вопросы в области анализа зеркальных антенн, которые требуют решения.

В **первой главе** проведен обзор литературы, сформулирована цель и основные задачи диссертации.

*Целью* диссертации является разработка эффективной математической модели, описывающей зеркальные антенны в режиме передачи, приема и рассеяния, обеспечивающей существенное уменьшение требований к компьютерным ресурсам при численном моделировании антенн по сравнению с коммерческими программами аналогичного назначения и получение информации о закономерностях, необходимых для проектирования, включая те, которые не описаны в известной литературе.

Типами антенн, которые широко используются и которые необходимо моделировать, являются:

- однозеркальная многолучевая антенна с различными типами параболических рефлекторов;
- двухзеркальная антенна с плоским контррефлектором для широкоугольного сканирования;
- двухзеркальная антенна Кассегрена.

Закономерностями, которые требуют дополнительного рассмотрения или не описаны в литературе, являются:

- зависимости электрических параметров зеркальной антенны от параметров рупорного облучателя, позволяющие оптимизировать одно- и двухзеркальные антенны по различным критериям;
- распределение поля в ближней зоне антенны в режимах передачи и приема;
- особенности сканирования в однолучевых зеркальных антеннах при фокусировке в ближнюю зону;
- развязка между каналами в многолучевых антеннах;

– рассеивающие свойства антенны.

Перечисленные выше типы зеркальных антенн и вопросы, требующие решения, являются объектами исследования диссертационной работы.

Во второй главе диссертации разработана математическая модель (ММ) зеркальной антенны обобщенной конструкции, основанная на методе физической оптики, интеграле Кирхгофа и теории возбуждения волноводов, описывающая характеристики антенны в режимах передачи, приема и рассеяния. Модель обеспечивает анализ поля антенны в любой области пространства (ближней, промежуточной, дальней), фокусировку антенны на заданное расстояние. Режим приема рассмотрен с целью последующего использования ММ для анализа многолучевой антенны в режиме приема.

В ММ использованы известные математические соотношения, а также полученные автором. Далее приводятся фрагменты ММ, описывающие однозеркальную антенну.

В режиме передачи с использованием интеграла Кирхгофа определено поле рупорного облучателя на поверхности рефлектора в однозеркальной антенне обобщенной конструкции с рефлектором в виде произвольной вырезки из параболоида вращения (тип «Оффсет»):

$$\vec{E}_s \approx -i \frac{E_{\text{гм}}}{2\lambda} (1 + \cos \gamma) \times$$
$$(\theta_o \sin \varphi_p + \varphi_o \cos \varphi_p) \int_{S_r} A_r(x_q, y_q) \cdot e^{i\Psi(x_q, y_q)} \cdot \frac{e^{ikR_{\text{qm}}}}{R_{\text{qm}}} dS_r, \quad (1)$$

где  $E_{\text{гм}}$  - максимальная амплитуда на раскрыве рупора, зависящая от мощности излучения;  $\gamma, \varphi_p$  - сферические координаты произвольной точки М на поверхности рефлектора в системе координат с началом в центре раскрыва рупора;  $\vec{\theta}_o, \vec{\varphi}_o$  - орты этой системы координат;  $R_{\text{qm}}$  - расстояние между произвольными точками на поверхности рефлектора (М) и на раскрыве рупора (Q);  $x_q, y_q$  - координаты точки Q;  $A_r(x_q, y_q), \Psi(x_q, y_q)$  - амплитудное и фазовое распределение (АФР) поля на раскрыве рупора;  $S_r$  - поверхности раскрыва рупора;  $k=2\pi/\lambda, \lambda$  - длина волны. Обычно формула (1) используется для определения поля некоторого раскрыва в дальней зоне, и расстояние  $R_{\text{qm}}$  из знаменателя подынтегрального выражения выносится за знак интеграла. Для повышения точности расчетов в описываемой ММ это не делается, так как рефлектор может быть расположен в промежуточной или ближней зоне рупора облучателя. При определении АФР на раскрыве рупора учтено изменение ам-



плитудно-фазового распределения поля на раскрыве рупорного облучателя по сравнению с амплитудно-фазовым распределением поля в поперечном сечении питающего прямоугольного волновода.

По полю на поверхности рефлектора методом физической оптики определен вектор плотности поверхностного тока

$$\vec{J}_s(x, y, z) = 2 \left[ \vec{n}_o, \vec{H}_s \right]. \quad (2)$$

Вектор магнитного поля  $\vec{H}_s$  на поверхности рефлектора определен по вектору  $\vec{E}_s$ ,  $\vec{n}_o$  - вектор единичной нормали к поверхности рефлектора в точке определения вектора плотности поверхностного тока.

По току  $\vec{J}_s$  методом векторного потенциала определяется вектор электрического поля в произвольной точке пространства.

$$\vec{E}(r, \theta, \varphi) \approx -i \frac{60\pi}{\lambda} \int_{S_p} \vec{J}_s \frac{e^{-ikR}}{R} dS_p, \quad (3)$$

где  $S_p$  - поверхность рефлектора;  $R$  - расстояние между точкой  $P$  на поверхности рефлектора и точкой наблюдения. Эта точка может быть расположена в любой зоне пространства (дальней, промежуточной, ближней). Поэтому расстояние  $R$  не выносится из под знака интеграла, что обычно делается при определении поля в дальней зоне.

В режиме приема и рассеяния с использованием выражения (2) определен ток на поверхности рефлектора при облучении его электромагнитной волной, излучаемой из произвольной точки пространства. Поле рассеяния определено формулой, аналогичной (3). В частности, в режиме приема найдено поле рассеяния рефлектора в произвольной точке раскрыва рупора:

$$\vec{E}(x_q, y_q, z_q) \approx -i \frac{60\pi}{\lambda} \int_{S_p} \vec{J}_s \frac{e^{-ikR_{qm}}}{R_{qm}} dS_p, \quad (4)$$

По полю на раскрыве рупора с использованием теории возбуждения волноводов методом собственных волн получено выражение для максимальной амплитуды электрического поля волны  $TE_{10}$  в прямоугольном волноводе, питающем рупор:

$$E_{\max} = \frac{1}{A_r \cdot B_r} \left| \int_{x=-0,5A_r}^{0,5A_r} \int_{y=-0,5B_r}^{0,5B_r} E_{py}(x, y) \cos\left(\frac{\pi \cdot x}{A_r}\right) dx \cdot dy \right|, \quad (5)$$

и переносимой этой волной мощности

$$P_r = \frac{E_{\max}^2}{4Z_v} A_r \cdot B_r \quad (6)$$

где  $A_r, B_r$  - размеры раскрыва рупора облучателя в плоскости Н и Е;  $E_{py}(x, y)$  - составляющая вдоль оси Y (в плоскости Е) вектора, определяемого выражением (4). Зависимость  $E_{\max}$  от угловых координат источника принимаемой волны есть диаграмма направленности антенны в режиме приема. Выражение (4) позволяет также рассчитать поле рассеяния рефлектора в произвольной точке пространства.

В автореферате не приводятся выражения, описывающие двухзеркальные антенны, соотношения, определяющие параметры диаграммы направленности и коэффициент направленного действия, а также ряд соотношений описывающих геометрию задач.

Проведено сравнение оригинальной программы Ref\_ZZ, разработанной на основе ММ, и коммерческой программы FEKO по основным показателям – точности моделирования и требуемым компьютерным ресурсам. Основные выводы из результатов сравнения:

1. Время решения одной и той же задачи в программе Ref\_ZZ на несколько порядков меньше, чем в программе FEKO, а объем необходимой оперативной памяти компьютера в несколько раз меньше. С ростом волнового диаметра рефлектора различие во времени решения задачи и объеме требуемой оперативной памяти возрастает.

2. Программы FEKO и Ref\_ZZ дают одинаковое значение отклонения главного лепестка ДН от фокальной оси при сканировании

3. Основные параметры диаграммы направленности (ширина главного лепестка и максимальный уровень боковых лепестков) в переднем полупространстве и значения КНД, рассчитанные в двух программах, отличаются на 5-10 %.

4. Структура боковых лепестков в двух программах различается, но средние уровни под различными углами в переднем полупространстве близки друг к другу.

5. Программа Ref\_ZZ дает несколько заниженное значение уровня максимально бокового лепестка, но различие в значениях этого параметра, полученных в двух программах, уменьшаются при увеличении волнового диаметра рефлектора и при увеличении угла сканирования. Эти расхождения объясняются тем, что

метод физической оптики, использованный в программе Ref\_ZZ, не учитывает краевых эффектов.

6. Вследствие указанных различий в уровне боковых лепестков программа Ref\_ZZ дает завышенное значение КНД (примерно на 1 дБ).

На рисунках 1, 2 показаны некоторые результаты сравнения двух программ. Обозначения:  $2Q_{0,5}$  – ширина главного лепестка (ГЛ) диаграммы направленности (ДН) по уровню половинной мощности;  $F_{bm}$  – максимальный боковой лепесток;  $DrY$  – смещение облучателя в фокальной плоскости для сканирования.

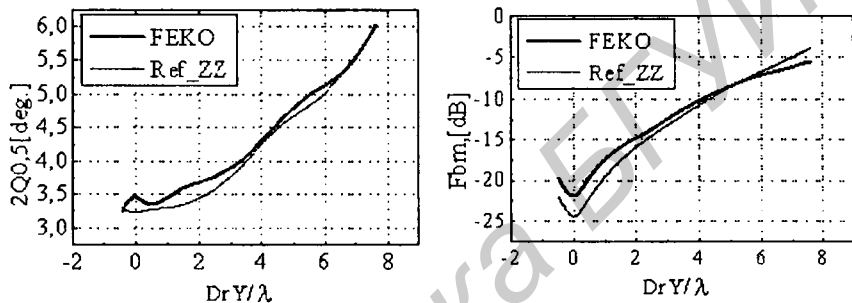
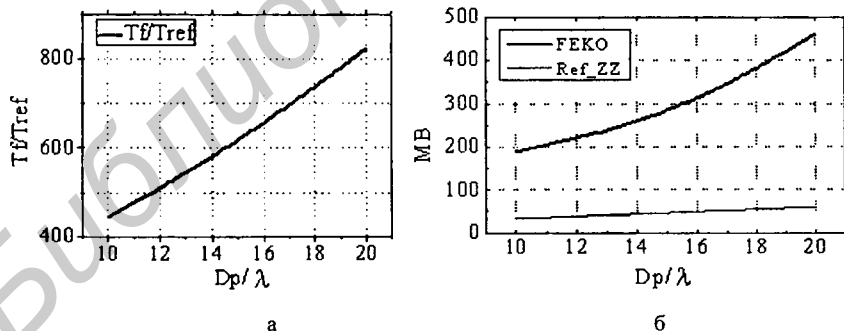


Рисунок 1 – Зависимость параметров ДН от смещения облучателя из фокуса. Волновой диаметр параболоида  $D_p/\lambda = 20$



а – отношение времени счета в программе FEKO ( $T_f$ ) и программе Ref\_ZZ ( $T_{ref}$ );

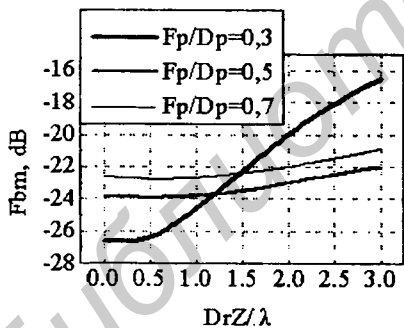
б – объем оперативной памяти компьютера в двух программах

Рисунок 2 – Зависимости от волнового диаметра рефлектора ( $D_p/\lambda$ )

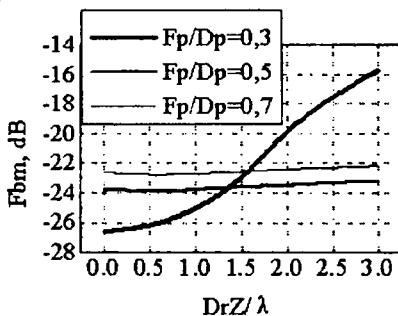
Выигрыш во времени решения задачи и требуемом объеме оперативной памяти компьютера достигнут тем, что в разработанной ММ при моделировании рупора облучателя использован метод интеграла Кирхгофа, а в программе ФЕКО – метод моментов, требующий при программной реализации больших компьютерных ресурсов. Платой за этот выигрыш является то, что уровень боковых лепестков в заднем полупространстве при использовании программы Ref\_ZZ получается завышенным.

В третьей главе изложены результаты моделирования однозеркальной антенны с параболоидом полного профиля и рефлектором типа «Оффсет». Рассмотрены новые вопросы: распределение поля в ближней зоне в режиме передачи и приема, вопросы фокусировки антенны на заданное расстояние и изменение параметров антенны при фокусировке в ближнюю зону; развязка между каналами в многолучевой антенне в режиме приема при фокусировке в ближнюю зону; вопросы сканирования в антенне с параболоидом полного профиля и типа «Оффсет».

Исследована зависимость параметров ДН и коэффициента направленного действия (КНД) от расстояния фокусировки антенны. Результаты оформлены в виде серии графиков, которые удобно использовать при оценке погрешности измерения ДН и КНД на уменьшенных расстояниях. Пример таких графиков показан на рисунке 3. На рисунке:  $DrZ$  – смещение облучателя вдоль фокальной оси с целью фокусировки антенн.



(а)  $D_p = 40\lambda$



(б)  $D_p = 50\lambda$

Рисунок 3 – Зависимость уровня максимального бокового лепестка от величины  $DrZ$

Показано, что в антенне типа «Оффсет» при  $Y_{min} = 0,5D_p$  (нижняя кромка рефлектора расположена на фокальной оси) сектор сканирования в два раза

меньше, чем в антенне с параболоидом полного профиля при одних и тех же ограничениях на ухудшение электрических характеристик антенны.

Исследовано распределение поля в ближней зоне в режиме приема сферической волны из заданной точки ближней зоны. Этот режим используется в системах радиовидения. На основании проведенного анализа получены не описанные в литературе закономерности в зависимости коэффициента развязки между каналами в многолучевой антенне при работе ее в режиме приема поля, рассеянного некоторым объектом, расположенным в ближней зоне.

Показано, что однопозиционная эффективная площадь рассеяния однозеркальной антенны при облучении антенны со стороны максимума диаграммы направленности существенно зависит от облучателя, но слабо зависит от нагрузки облучателя. Поле рассеяния рефлектора в обратном направлении при облучении антенн плоской электромагнитной волной со стороны максимума диаграммы направленности уменьшается при увеличении  $Y_{\min}$  в офсетной антенне. Это может быть использовано для уменьшения радиолокационной заметности зеркальной антенны.

Глава 4 посвящена моделированию двухзеркальных антенн. Рассмотрены два типа двухзеркальных антенн – двухзеркальная антенна с плоским контррефлектором и двухзеркальная антенна Кассегрена. Двухзеркальная антенна с плоским контррефлектором показана на рисунке 4. Принцип построения и работы антенны описан в литературе, антенна используется в ряде радиолокационных систем, а теория и основные закономерности не описаны. На рисунке обозначено: 1 – рупорный облучатель; 2 – параболический рефлектор в виде системы тонких проводников, параллельных вектору  $E$  поля облучателя; 3 – плоский контррефлектор с системой поворота плоскости поляризации поля рефлектора на  $90^\circ$ . Сканирование производится путем поворота контррефлектора на угол  $G_x$ .

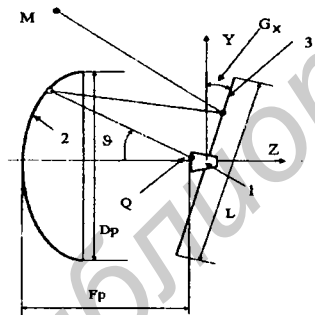


Рисунок 4 – Двухзеркальная антенна

На рисунке не показан диэлектрический параболический обтекатель, на поверхность которого уложены проводники рефлектора. Диаметр параболического рефлектора –  $D_p$ ; диаметр контррефлектора –  $L$ ; расстояние между контррефлектором и вершиной рефлектора –  $F_d$ .

В диссертации проведен подробный численный анализ и исследованы основные закономерности зависимости параметров ДН и КНД при сканирова-

нии от геометрических параметров элементов антенны. Для примера на рисунках 5, 6 показаны некоторые зависимости. На рисунках приведены результаты для параметров рефлектора  $D_p=30\lambda$ ;  $F_p/D_p=0,5$ .

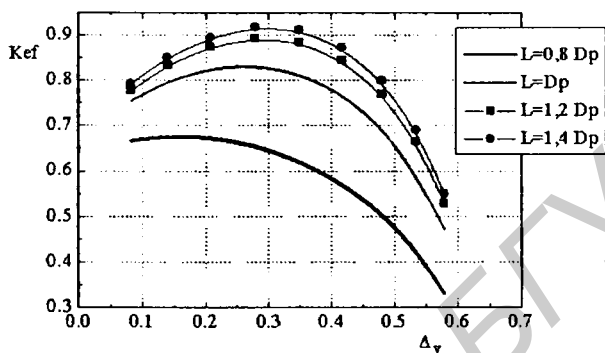


Рисунок 5 – Зависимость коэффициента эффективности  $K_{ef}$  от уровня поля на краю рефлектора  $\Delta_y$

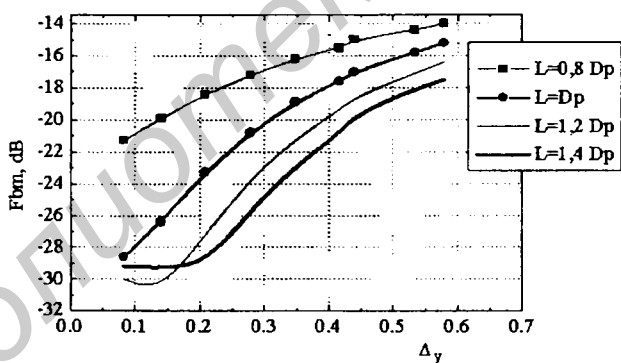
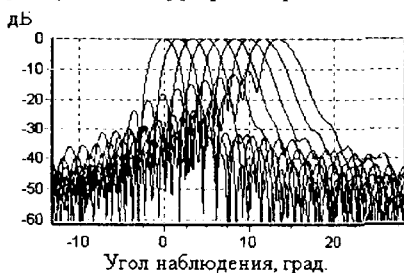


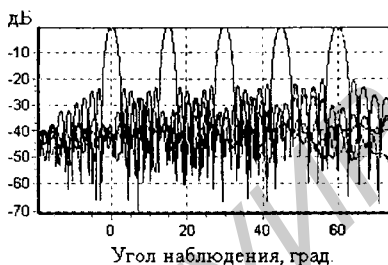
Рисунок 6 – Зависимость уровня боковых лепестков от величины подставки в амплитудном распределении  $\Delta_y$  в плоскости E

Рисунок 7 иллюстрирует возможности сканирования двухзеркальной антенны с плоским контррефлектором по сравнению с однозеркальной антенной. В однозеркальной антенне максимальный угол сканирования равен 4–5 значениям ширины главного лепестка ДН, в двухзеркальной антенне при таких же

ограничениях на ухудшение параметров ДН это угол может быть равным 50–60°, так как при сканировании не появляется кубической фазовой ошибки на раскрыве контррефлектора.



Однозеркальная антенна



Двухзеркальная антенна

Рисунок 7 – ДН антенны при сканировании: параметры рефлектора

$$D_p = 30\lambda, F_p/D_p = 0,5$$

В диссертации исследовано влияние диэлектрического обтекателя параболической формы, на котором уложены проводники рефлектора, а также дополнительного метеозащитного обтекателя.

Выполнены численные исследования двухзеркальной антенны Кассегрена. Получены закономерности, не описанные в литературе: зависимость геометрических и электрических параметров антенны от эксцентриситета гиперболического контррефлектора, зависимость параметров антенны от положения облучателя относительно вершины параболоида и другие закономерности.

На рисунке 8 показана зависимость коэффициента эффективности антенны от эксцентриситета гиперболоида, рассчитанная при условии равенства уровня поля облучателя на краю гиперболоида 0,3 от максимума в центре. При этом условии получены зависимости параметров антенны от положения облучателя вдоль фокальной оси, что в литературе на уровне количественных закономерностей не рассмотрено. Это положение характеризуется значением  $H_0$  – расстоянием апертуры рупора облучателя от вершины параболоида. На рисунке 9 показана зависимости коэффициента эффективности антенны от величины  $H_0$  ( $F_p$  – фокусное расстояние параболоида). Параметр  $H_0$  выбирается при проектировании антенны и является дополнительной степенью свободы по сравнению с однозеркальной антенной. Как видно, коэффициент эффективности при некотором расстоянии  $H_0$  достигает максимума. Приведенные результаты получены при условии сохранения уровня поля на краю гиперболоида, равным 0,3 от максимума в центре при изменении  $H_0$ . Указанный уровень поля

на краю гиперболоида соответствует максимуму коэффициента эффективности антенны.

Описанные закономерности, полученные численно, могут быть использованы при разработке двухзеркальной антенны Кассегрена на этапе проектирования.

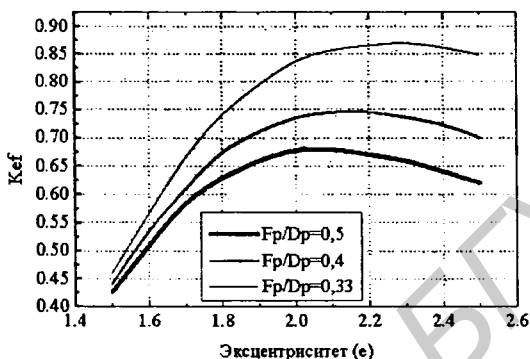


Рисунок 8 – Зависимость коэффициента эффективности от эксцентриситета гиперболоида

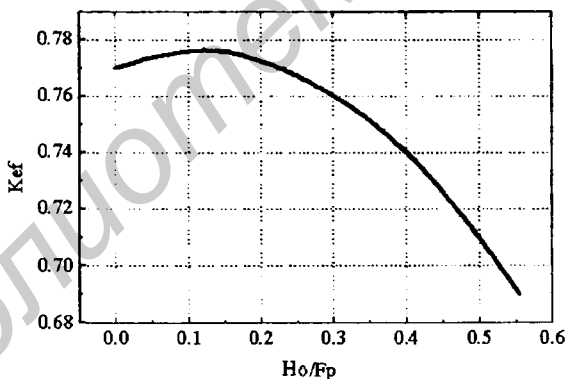


Рисунок 9 – Зависимость коэффициента эффективности антенны от места положения облучателя

В целом все результаты численного моделирования, полученные с помощью программы, реализующей разработанную математическую модель, являются новыми и предназначены для использования при проектировании и оптимизации различных типов зеркальных антенн.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Основные научные результаты диссертации

1. Разработана математическая модель зеркальной антенны, основанная на методе физической оптики, интеграле Кирхгофа и теории возбуждения волноводов, отличающаяся возможностью моделирования поля зеркальных антенн во всех режимах в ближней и дальней зонах без ограничения на волновой диаметр рефлектора, обеспечивающая при численном моделировании антенн сокращение требуемого объема оперативной памяти компьютера в несколько раз и времени решения задачи на 1–3 порядка в зависимости от волнового диаметра рефлектора. Так же как и известные коммерческие программы CST, HFSS, FEKO, математическая модель учитывает нелинейное фазовое распределение поля на раскрыве рупора облучателя и то, что поверхность рефлектора расположена в ближней или промежуточной зоне по отношению к облучателю, а поверхность контррефлектора в двухзеркальных антеннах расположена в ближней зоне облучателя.

Существенное сокращение требуемой оперативной памяти компьютера и времени решения задачи по сравнению с упомянутыми коммерческими программами электродинамического моделирования общего назначения достигнуто тем, что, во-первых, программное обеспечение, созданное на основе разработанной ММ, является узкоспециализированным; во-вторых, в ММ при расчете поля облучателя используется метод Кирхгофа, а не метод конечных элементов и не метод моментов [1–А, 3–А, 4–А, 5–А].

2. Получены новые результаты исследования закономерностей в распределении поля в ближней зоне зеркальной антенны в режиме передачи. Показано, что распределение поля в ближней зоне вдоль фокальной оси в антенне типа «Оффсет» более равномерно по сравнению с таким распределением в зеркальной антенне с параболоидом полного профиля [4–А, 5–А, 6–А]. Полученные закономерности позволяют более точно оценить коллимационные свойства зеркальной антенны и экологическую обстановку вблизи антенны.

3. Получены новые результаты в зависимости развязки между каналами в многолучевой зеркальной антенне при приеме электромагнитной волны из ближней и промежуточной зон от геометрических параметров антенны и расстояния до точки фокусировки. Эти закономерности позволяют оптимизировать приемную зеркальную антенну в системах радиовидения, работающих в ближней зоне [1–А, 3–А, 7–А].

4. Получены не описанные в литературе закономерности сканирования в зеркальной антенне с параболическим рефлектором типа «Оффсет». Показано,

что сектор сканирования в такой антенне по сравнению с полнопрофильной параболической антенной уменьшается в 2 раза при одних и тех же параметрах рефлектора и ограничениях на ухудшение электрических параметров антенны при сканировании [4–А, 5–А, 12–А].

5. Получены новые результаты в зависимости электрических характеристик двухзеркальной антенны с плоским контррефлектором от геометрических параметров антенны, позволяющие оптимизировать антенну по коэффициенту направленного действия и уровню боковых лепестков при сканировании в диапазоне углов, превышающем такой сектор в однозеркальной антенне в 4–5 раз [2–А, 5–А].

6. Получены новые закономерности влияния облучателя на рассеивающие свойства зеркальной антенны. Показано, что однопозиционная эффективная площадь рассеяния рефлектора зеркальной антенны типа «Оффсет» при облучении антенны со стороны максимума диаграммы направленности может быть уменьшена на 10–15 дБ путем выбора положения вырезки из параболоида вращения по отношению к фокальной оси. Это может быть использовано при разработке мер по уменьшению радиолокационной заметности зеркальной антенны [1–А, 8–А, 9–А, 11–А].

### **Рекомендации по практическому использованию результатов**

1. Разработанная математическая модель зеркальной антенны и реализующее ее программное обеспечение в силу указанных выше особенностей и отличий от известных коммерческих программ рекомендуется для использования при моделировании зеркальных антенн с любыми заданными волновыми диаметрами рефлектора; зеркальных антенн со сложным облучателем, обеспечивающим формирование нескольких лучей, в том числе моноимпульсных; двухзеркальных антенн с плоским контррефлектором, обеспечивающих широкоугольное сканирование, учет влияния случайных ошибок выполнения профиля на характеристики зеркальной антенны.

2. Разработанное программное обеспечение использовано при разработке двухзеркальной антенны с плоским контррефлектором по контракту № 07-1175\_К (НИЧ БГУИР).

3. Программа моделирования зеркальных антенн Ref\_ZZ, построенная на основе разработанной математической модели, и закономерности в зависимости электрических характеристик от геометрических параметров антенн, полученные в результате численного моделирования различных типов зеркальных антенн и приведенные в диссертации в виде графиков, могут быть использованы при проектировании и оптимизации одно- и двухзеркальных антенн различных типов в организациях, занимающихся разработкой радиотехнических систем: «КБ РАДАР», «АЛЕВКУРП», «ТЕТРАЭДР».

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

### Статьи в научных рецензируемых журналах

1–А. Юрцев, О.А. Развязка между каналами многолучевой зеркальной антенны в режиме приема сферической волны / О.А. Юрцев, Н.М. Наумович, С.А. Чекан, М.М. Дгали // Известия вузов. Радиозлектроника. – 2010. – Т. 53, № 4. – С. 44–50.

2–А. Yurtsev, O. Numerical simulation of double-reflector antenna with flat subdish / O. Yurtsev and M.M. Dghali // Academy Publish. Journal of Computer and Information Technology. – 2012. – Vol. 2, Iss. 1. – P. 100–107.

3–А. Юрцев, О.А. Зеркальная антенна в режиме приема сферической волны / О.А. Юрцев, Н.М. Наумович, М.М. Дгали // Доклады БГУИР. – 2012. – № 5 (67). – С. 9–15.

4–А. Дгали, М.М. Численное моделирование характеристик излучения однозеркальной антенны / М.М. Дгали // Доклады БГУИР. – 2013. – № 1 (71). – С. 57–61.

### Статьи в сборниках материалов конференций

5–А. Юрцев, О.А. Распределение поля и диаграмма направленности в режиме приема зеркальной антенны, сфокусированной в ближнюю и дальнюю зоны / О.А. Юрцев, М.М. Дгали // Vedecky Pokrok na Prelomu Tusyachalety – 2012 : VIII Mezinarodni vedecko-praktika konference 27.05.2012–05.06.2012, Praha. – Praha, 2012. – С. 11–17.

6–А. Дгали, М.М. Численное моделирование зеркальных антенн типа «Оффсет» с использованием комбинации метода физической оптики и апертурного метода / М.М. Дгали // Новината за напреднали наука. Технологии – 2012: материалы VIII Междунар. науч.-практ. конф., София, 17-25 мая 2012. – Белград, 2012. – С. 83–89.

7–А. Yurtsev, O.A. Effect of random errors of reflector profile on characteristics of single reflector antenna / O.A. Yurtsev, N.M. Naumovich, M.M. Dghali // Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals : materials of the 6<sup>th</sup> International Conference, 17–21 Sept. 2012, Sevastopol, Ukraine. – Sevastopol, 2012. – P. 183–185.

8–А. Дгали, М.М. Рассеяние поля зеркальными антеннами / М.М. Дгали // Новейшие научные достижения – 2013: материалы IX Междунар. науч.-практ. конф., 17–25 марта 2013 г., Болгария. Т. 22. Здание и архитектура: технологии 2013. – София, 2013. – С. 64–75.

### Тезисы докладов на конференциях

9–А. Дгали, М.М. Моделирование зеркальных антенн в программе FEKO и в специализированной программе / М.М. Дгали // Современные проблемы

радиотехники и телекоммуникаций РТ-2011: тез. докл. 7-й Междунар. молодеж. науч.-техн. конф., 11–15 апр. 2011 г., Севастополь, Украина. – Севастополь, 2011. – С. 244.

10–А. Dghali, M.M. Feed Influence on Reflector Antenna Scattering Pattern / M.M. Dghali // TCSET'2012: the XI<sup>th</sup> International Conference / Lviv – Slavske, Ukraine, February 21–24, 2012. – С. 180.

11–А. Дгали, М.М. Характеристики рассеяния зеркальной антенны типа «Оффсет» / М.М. Дгали // Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций РТ-2013: тез. докл. 9-й междунар. молодеж. науч.-техн. конф., 22–26 апр. 2013 г., Севастополь, Украина. – Севастополь, 2013. – С. 212.

12–А. Дгали, М.М. Сканирование в зеркальной антенне типа «Оффсет» / М.М. Дгали, К.А. Решиков // тез. докл. 9-й междунар. молодеж. науч.-техн. конф. 22–26 апр. 2013 г., Севастополь, Украина. – Севастополь, 2013. – С. 194.

Дгалі Мухамед Масуд Х.

## Характарыстыкі выпраменьвання і расейвання люстраных антэн. Колькасны аналіз і аптымізацыя

**Ключавыя словы:** матэматычная мадэль, метады фізічнай оптыкі, тэорыя ўзбуджэння хваляводаў, метады інтэграла Кірхгофа, аднозеркальная антэна з параболойдоў поўнага профілю, люстраная антэна тыпу «Оффсет», двулүстраная антэна Кассегрена, двулүстраная антэна з плоскім контррэфлектарам, блізкая зона, факусоўка, развязка паміж каналамі, асноўныя заканамернасці ў размеркаванні поля, сканіраванне.

**Мэта працы:** распрацоўка эфектыўнай матэматычнай мадэлі, якая апісвае заканамернасці ў люстэркавых антэнах розных тыпаў ў рэжыме перадачы, прыёму і расейвання і якая забяспечвае істотнае змяншэнне патрабаванняў да кампутарных рэсурсаў пры лікавым мадэляванні антэн у параўнанні з камерцыйным праграмамі аналагічнага прызначэння.

**Атрыманыя вынікі і іх навізна:**

1. Распрацавана матэматычная мадэль люстраной антэны і праграма, якая рэалізуе яе, яны дазваляюць колькасна мадэляваць розныя тыпы люстэркавых антэн у рэжыме выпраменьвання, прыёму і расейвання і аптымізаваць канструкцыю антэны шляхам перабору геаметрычных параметраў пры скарачэнні часу рашэнні задачы на 1-3 парадку і аб'ёму патрабаванай аператыўнай памяці камп'ютэра ў некалькі раз у залежнасці ад хвалевага дыяметра рэфлектара ў параўнанні з камерцыйнымі праграмамі электрадынамічнага мадэлявання агульнага прызначэння CST, HFSS, FEKO.

2. Атрыманы новыя вынікі мадэлявання аднелүстраной і двулүстраных антэн, якія адлюстроўваюць не апісаныя ў літаратуры заканамернасці залежнасці электрычных параметраў антэн ад геаметрычных параметраў элементаў, якія палягчаюць аптымізаваць антэну па розных крытэрах. Заканамернасці аформлены ў выглядзе графікаў, вынікаў і рэкамендацый і дазваляюць скараціць час праектавання на этапе выбару тыпу люстраной антэны і вызначэння геаметрычных параметраў яе элементаў.

Дгали Мухамед Масуд Х.

Характеристики излучения и рассеяния зеркальных антенн.

Численный анализ и оптимизация

**Ключевые слова:** математическая модель, метод физической оптики, теория возбуждения волноводов, метод интеграла Кирхгофа, однозеркальная антенна с параболоидом полного профиля, зеркальная антенна типа «Оффсет», двухзеркальная антенна Кассегрена, двухзеркальная антенна с плоским контррефлектором, ближняя зона, фокусировка, развязка между каналами, основные закономерности в распределении поля, сканирование.

**Цель работы:** разработка эффективной математической модели, описывающей закономерности в зеркальных антеннах различных типов в режиме передачи, приема и рассеяния и обеспечивающей существенное уменьшение требований к компьютерным ресурсам при численном моделировании антенн по сравнению с коммерческими программами аналогичного назначения.

**Полученные результаты и их новизна:**

1. Разработана математическая модель зеркальной антенны и реализующая ее программа, позволяющие численно моделировать различные типы зеркальных антенн в режиме излучения, приема и рассеяния и оптимизировать конструкцию антенны путем перебора геометрических параметров при сокращении времени решения задачи на 1–3 порядка и объема требуемой оперативной памяти компьютера в несколько раз в зависимости от волнового диаметра рефлектора по сравнению с коммерческими программами электродинамического моделирования общего назначения CST, HFSS, FEKO.

2. Получены новые результаты моделирования однозеркальной и двухзеркальных антенн, отражающие не описанные в литературе закономерности в зависимости электрических параметров антенн от геометрических параметров элементов, облегчающие оптимизировать антенну по различным критериям. Закономерности оформлены в виде графиков, выводов и рекомендаций и позволяют сократить время проектирования на этапе выбора типа зеркальной антенны и определения геометрических параметров ее элементов.

## SUMMARY

**Dghali Mohamed Masaud K.**

**Characteristics of radiation and scattering reflector antennas.**

**Numerical analysis and optimization**

**Keywords:** mathematical model, physical optics method, theory of waveguide excitation, Kirchhoff integral method, single-reflector paraboloidal antenna, "Offset" reflector antenna, double reflector Cassegrain antenna, double reflector antenna with a flat sub-reflector, near field, focusing, antenna channels isolating, basic regularities in the distribution field, scanning.

**The work purpose:** development of an effective mathematical model describing the patterns in different types of reflector in the transmission, receiving and the scattering modes, and providing a significant reduction in requirements for computer resources for numerical modeling of antennas in compare to the commercial programs of similar purpose.

**The results obtained and their novelty:**

1. mathematical model of the reflector antenna and its implementing program was developed, it allows to simulate different types of reflector antennas in the transmission, receiving and the scattering modes, and optimize the design of the antenna by searching the geometric parameters with reduction in time by 1-3 orders of magnitude and RAM of several times depending on the wave reflector diameter compared with commercial software electrostatics simulation of general-purpose CST, HFSS, FEKO.

2. New results of single-reflector antennas and double-reflector modeling are received, they shown the dependencies of the electrical regularities of the antenna parameters on the geometric parameters of the elements that make it easier to optimize the antenna according to different criteria, which are not described in the literature. Regularities are decorated in the form of graphs, conclusions and recommendations, and it allows reducing the design time when selecting the type of reflector antenna and determining the geometric parameters elements.

*Научное издание*

**ДГАЛИ Мухамед Масуд Х.**

**ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ И РАССЕЯНИЯ ЗЕРКАЛЬНЫХ  
АНТЕНН  
ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ И ОПТИМИЗАЦИЯ**

Специальность 05.12.07 – Антенны, СВЧ-устройства и их технологии

**Автореферат**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

---

Подписано в печать 23.04.2013.	Формат 60x84 <sup>1</sup> / <sub>16</sub> .	Бумага офсетная.
Гарнитура «Таймс».	Отпечатано на ризографе.	Усл. печ. л. 1,63.
Уч.-изд. л. 1,3.	Тираж 60 экз.	Заказ 122.

---

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования  
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

ЛИ №02330/0494371 от 16.03.2009. ЛП №02330/0494175 от 03.04.2009.

220013, Минск, П. Бровки, 6