

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ СССР ПО НАРОДНОМУ ОБРАЗОВАНИЮ
ХАРЬКОВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ И ОРДЕНА ДРУЖБЫ
НАРОДОВ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ им. А.М.ГОРЬКОГО

*Борисов
Калин с
автор на фото и т.д.*

На правах рукописи

УДК 537.8.029.6; 621.37.029.6

ГАЗАЗЯН
ЭДМОНД ДАВИДОВИЧ

ВЕКТОРНЫЕ ЗАДАЧИ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ
КВАЗИОПТИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ

Специальность 01.04.03 - радиофизика

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
доктора физико-математических
наук

Харьков - 1989

Работа выполнена в Ереванском физическом институте.

Официальные оппоненты:

1. доктор физико-математических наук,
профессор Кравцов Юрий Александрович (г. Москва),
2. доктор физико-математических наук,
профессор Бьков Владимир Павлович (г. Москва),
3. доктор физико-математических наук,
профессор Хижняк Николай Антонович (г. Харьков).

Ведущее предприятие: Институт радиотехники и электроники
АН СССР.

Защита состоится " _____ " _____ 1990г. в _____ часов

на заседании специализированного совета Д.068.31.01 при
Харьковском государственном университете им. А.М.Горького
(310077, г.Харьков, пл. Дзержинского, д.4, ауд. _____).

С диссертацией можно ознакомиться в Центральной научной
библиотеке ХГУ.

Автореферат разослан " _____ " _____ 1990г.

Ученый секретарь
специализированного совета



В.И.Чеботарев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Создание равномерной коротковолновой асимптотической теории решений уравнений Гельмгольца и Максвелла является актуальной современной задачей: с ее решением строгие методы геометрической оптики (ГО) и геометрической теории дифракции (ГТД), базирующиеся на уравнениях Гельмгольца и Максвелла, становятся весьма эффективным средством при количественном описании полей во внутренних и внешних задачах электродинамики квазиоптических устройств (волноводы и световоды, открытые и замкнутые резонаторы, антенны СВЧ) в коротковолновом диапазоне длин волн, равно как при описании качественных свойств этих устройств в более длинноволновой области. Приближенные описания полей, основывающиеся на лучевых представлениях – приближениях ГО и ГТД, не применимы в окрестностях каустик – огибающих конгруэнций лучей, где амплитуды решений ГО уравнений переноса обращаются в бесконечность, а фазы терпят разрыв. Физическое содержание указанных расходимостей заключается в исходном положении ГО, а именно, в том, что длина волны в этом приближении принимается равной нулю, и, следовательно, поперечное сечение лучевой трубки стремится к нулю на каустике. Для устранения таких расходимостей конструируются равномерные асимптотические разложения решений уравнений Гельмгольца и Максвелла, правильно описывающие поля в указанных областях и переходящие в геометрико-оптические выражения вдали от них. Эти разложения содержат комбинации специальных ("эталонных") функций и их первых производных, построенные таким образом, чтобы поле вдали от каустики имело лучевую структуру, совпадающую с ГО или ГТД, и оставалось конечным в области каустики. Пионерскими в этом направлении были работы Ю.А.Кравцова.

Теория измерений характеристик антенн в настоящее время базируется, в основном, на асимптотическом приближении Кирхгофа (ПК). Между тем, этот метод, сыгравший громадную роль в развитии теории и техники антенн и в исследованиях распространения волн, ограничен в смысле пределов своей применимости и позволяет получать, скорее, качественные (что само по себе совсем не

маловажно) результаты. Этим обуславливается актуальность поиска новых методов и разработки строгих алгоритмов в реализации измерений характеристик антенн. Строгие методы в теории измерений характеристик антенн должны быть основаны на уравнениях Максвелла (или Гельмгольца для скалярных волн) без привлечения эвристических соображений. Такими являются ближнезонные методы, основанные на возможности представлений полей излучающих систем в виде разложения по той или иной системам базисных функций, удовлетворяющих уравнениям Максвелла. Полученные ближнезонными методами результаты представляются наиболее строгими и полными, что обусловило интенсивное развитие этих методов за последние 20–25 лет. Это делает актуальным пристальное рассмотрение и исследование наиболее перспективного ближнезонного метода, основанного на разложении поля антенны по сферическим мультиполям (гармоникам).

Интенсивное развитие ближнезонных методов не сводит на нет традиционные дальнезонные методы измерений характеристик антенн. Большой практический интерес представляет также усовершенствование методов измерений характеристик бортовых антенн летательных аппаратов (ЛА) в условиях реального полета, разработка строгих алгоритмов проведения измерений и обработки их данных в целях получения достоверных результатов, наиболее полно характеризующих исследуемый объект.

Во всех случаях измерений характеристик антенн возникает проблема определения влияния земли и окружающих предметов на результаты измерений. Строгая математическая постановка и решение задачи определения уровня мешающих сигналов на измерительных полигонах и в безэховых камерах также является весьма актуальной и, как показано в диссертации, может быть реализована в рамках как ближнезонных, так и традиционных дальнезонных методов.

Цель работы. Разработать единый метод равномерных коротковолновых асимптотических решений электродинамических задач на базе одномерных эталонных функций, включая:

- строгое доказательство основных положений равномерной коротковолновой асимптотической теории решений уравнений Гельмгольца и Максвелла;

- исследование методологических вопросов этой теории, возможностей и пределов ее применимости;

- применение развитой асимптотической теории для конкретных задач электродинамики квазиоптических устройств, когда точных решений не существует;

- подробное систематическое исследование полученных решений.

Разработать новые методы и алгоритмы измерений характеристик антенн и антенных полигонов, включая:

- теоретические и экспериментальные исследования по развитию метода измерений характеристик антенн, основанного на разложении поля излучения антенны по сферическим гармоникам на сферической поверхности, охватывающей антенну в ее ближней зоне;

- разработка теории и строгих алгоритмов измерений характеристик бортовых антенн ЛА с помощью аттестованной наземной антенны в условиях реального полета ЛА;

- исследования вопросов влияния земли при измерениях характеристик антенн, разработка новых эффективных методов определения полей, отраженных (рассеянных) землей или окружающими предметами при таких измерениях.

Научная новизна. Впервые доказано, что в произвольной неоднородной изотропной среде уравнения Гельмгольца и Максвелла допускают равномерные коротковолновые асимптотические решения на базе одномерных эталонных функций с помощью соответствующих геометрооптических (неравномерных) разложений. Амплитуды этих решений являются линейными комбинациями расходящихся на каустиках геометрооптических амплитуд, а координатные функции – аргументами эталонных функций, определяемыми из соответствующих уравнений эйконалов в рассматриваемой системе координат и условий ортогональности.

На основе доказанных утверждений и разработанной общей методологии в диссертации развита электромагнитная асимптотическая теория для волновода (световода) и сферического резонатора с радиально-неоднородным диэлектрическим заполнением, для полых эллипсоидального, сфероидального (вытянутого и сплюснутого) и тороидального резонаторов. Впервые получены и исследованы "квантовые" условия, определяющие собственные частоты таких ре-

зонаторов для всех типов электромагнитных колебаний и волн. Впервые исследована проблема вырождения электромагнитных колебаний в указанных квазиоптических устройствах. В тороидальном резонаторе исследован эффект снятия вырождения кривизной тора.

Развитая асимптотическая теория оказывается эффективной и при решении дифракционных задач для такого класса квазиоптических устройств как антенны. В диссертации впервые решена проблема приближения Кирхгофа для больших углов дифракции в случае однозеркальных осесимметричных антенн. Разработанный метод сочтения ГО и ГТД равномерных приближений указывает, как можно решить проблему расчета многозеркальных оптических схем.

В диссертации предложены алгоритмы определения электромагнитных полей антенн по измерениям на сферической поверхности, охватывающей антенну. Впервые показано, что алгоритм, основанный на свойствах "обобщенной" ортогональности сферических гармоник, а) обеспечивает исключение "вклада" побочных источников излучений на результаты измерений, если эти источники расположены вне сферы измерений; б) позволяет определить КНД антенны по коэффициентам разложения ее поля излучения по сферическим гармоникам, минуя процесс восстановления; в) дает возможность определить "центр излучения" антенны как центр той сферической поверхности измерений, при выборе которой обеспечивается минимальное число гармоник, входящих в разложение и привлекаемых для восстановления поля излучения с заданной точностью; г) позволяет проводить измерения с помощью неподвижного зонда с использованием поворотного устройства антенной системы для различных случаев монтажа антенн.

Разработан алгоритм определения электромагнитных характеристик поля излучения бортовых антенн ЛА в условиях реального полета по результатам согласованных измерений параметров траектории ЛА, его эволюций и параметров сигнала на выходе наземной измерительной антенны в процессе ее слежения за ЛА.

Проблема учета влияния земли и окружающих предметов на результаты измерения параметров антенн в диссертации рассмотрена и решена тремя различными способами: а) оценка величины отраженного (рассеянного) от земли или окружающих предметов сигнала на антенном полигоне, основанная на установлении количественной

связи между этой величиной и амплитудой искажения равномерного распределения поля в области раскрытия антенны; б) оценка уровня отраженных (рассеянных) сигналов сканированием лучом вспомогательной остроуправленной антенны поверхности существенно отражающих участков полигона; в) определение отраженных и рассеянных полей путем Фурье-анализа поля излучения на плоской поверхности в области раскрытия испытуемой антенны (радиологический метод). Выведены условия минимальности размера области измерений (размер голограммы), обеспечивающие уверенное разрешение, а также требование к длине когерентности. Проведены реальные измерения этим методом.

Практическая ценность. Созданная на основе развитой равномерной коротковолновой асимптотической теории методология решения электродинамических задач для квазиоптических устройств широкого класса (волноводы и световоды, резонаторы сложной формы — эллипсоидальные, тороидальные и пр., антенны СВЧ) позволяет рассматривать проблемы, для которых не существует точного решения или когда получение такого решения сопряжено с математическими или расчетными трудностями. Получаемые асимптотические решения позволяют описать наглядную картину электромагнитного поля — каустические поверхности, их формы и особенности, типы волн и колебаний, определить (асимптотически) собственные частоты, исследовать проблему вырождения электромагнитных колебаний. Формулы и уравнения при этом легко алгоритмируются для проведения расчетов на ЭВМ. По ним могут быть рассчитаны также квазиоптическая схема лазера на свободных электронах, используя результаты, полученные для сфероидальных резонаторов; ускоряющие полости в виде тороидальных резонаторов, свободных от паразитных мод и обладающие высокой добротностью; поляризационные эффекты в световодах и пр. Результаты, полученные для тороидального резонатора, могут оказаться полезными также при расчетах систем типа "токамак", когда неоднородность плазмы, содержащейся в резонаторе, можно аппроксимировать функцией, обладающей тороидальной симметрией.

Равномерная асимптотическая теория для однозеркальных антенн дает возможность рассчитать вклад "неравномерной" части тока на краю рефлектора. Это позволяет существенно уточнить при —

ближение Кирхгофа для больших углов дифракции и сделать его надежным инструментом для количественного описания полей антенн. Предложенный метод сочетания ГО и ГТД равномерных приближений является, по-видимому, единственной возможностью рассчитать многозеркальные оптические схемы.

Развитая на основе свойств "обобщенной" ортогональности сферических гармоник методика измерений характеристик антенн на сферической поверхности, охватывающей антенну в ее ближней зоне, имеет ряд практических достоинств. Важнейшими из них являются полнота, точность и достоверность полученных результатов. Это обусловлено тем, что а) разработанный алгоритм исключает искажающее влияние побочных излучений от предметов, расположенных вне сферической поверхности измерений; б) коэффициент направленного действия антенны определяется с помощью коэффициентов разложения, минуя процесс восстановления поля излучения; в) получение поляризационных характеристик поля излучения не требует проведения дополнительных измерений; г) продолжительность измерений регламентирована лишь скоростью сканирования зонда либо возможностями поворотного устройства в случае проведения измерений с помощью неподвижного зонда. В рамках метода вводится понятие центра излучения антенны вместо часто используемого фазового центра, не имеющего четкой физической интерпретации. Проведен анализ погрешностей, обусловленных конечным числом привлекаемых в разложение гармоник, ограниченностью сектора измерений, степенью точности измерений амплитуд и фаз. Сформулированы требования к поворотному устройству испытываемой антенны (или к точности установки измерительного зонда), исследован и обоснован выбор шага, сектора измерений и количества необходимого числа гармоник, привлекаемых в разложение поля излучения. Результаты исследований алгоритмов и программ, проведенных путем модельных экспериментов на ЭВМ и физических экспериментов с реальной антенной, подтверждают работоспособность и свидетельствуют о высокой устойчивости метода к "искажениям" ближнего поля (моделирование точности измерения ближнего поля), ограничению числа гармоник и сектора измерений.

Методика измерений параметров бортовых антенн, установленных на ЛА, позволяет по полученным строгим формулам определить

все электромагнитные характеристики поля излучения бортовой антенны и погрешности измерений. Полученные строгие выражения для полей и подробный анализ погрешностей позволяют выработать мотивированные рекомендации о типах траекторий полетов и эволюций ЛА в зависимости от поляризации поля излучения и места установки антенны на борту ЛА. Исходя из современно достигаемых точностей датчиков углов эволюций на борту ЛА, доказано, что наиболее достоверные и точные результаты могут быть получены при горизонтальных траекториях ЛА без эволюций и преимущественной линейной поляризации поля излучения. Этим мотивирован вывод о целесообразности проведения измерений характеристик бортовых антенн в условиях безэховой камеры на облегченных макетах ЛА, установленных на поворотное устройство.

В диссертации предложены и апробированы методы учета влияния земли и окружающих предметов в зависимости от типа и назначения антенн и антенных полигонов. Они позволяют обосновывать с достаточной степенью достоверности возможность пренебрежения этим влиянием и оценить возникающую при этом погрешность. Метод Фурье-анализа поля излучения на плоской поверхности в области раскрытия антенны (математическая голография) позволяет определить спектр плоских волн (амплитуды, фазы, направления распространения), попадающих на испытываемую антенну, выявить существенно отражающие участки.

Принципиальные положения разработанных в диссертации методик, а также некоторые из решенных задач, отличающиеся наглядностью, используются в лекционных курсах для специалистов-радиофизиков, которые читаются автором на протяжении последних лет на радиофизическом факультете ЕРГУ [1,2].

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

I. Развита равномерная коротковолновая асимптотическая теория скалярных и электромагнитных полей на основе одномерных эталонных функций для внутренних и внешних задач электродинамики квазиоптических устройств.

I.I. Строго доказаны общие положения этой теории и сделаны методологические разъяснения для ее применения.

1.2. Получена коротковолновая асимптотика собственных электромагнитных колебаний в цилиндрическом волноводе с радиально-неоднородным заполнением, сферическом резонаторе с радиально-неоднородным заполнением, полых эллипсоидальном и сфероидальном (вытянутом и сплюснутым) резонаторах, тороидальном резонаторе с тороидальной неоднородностью среды и в полном тороиде для однородных тороидальных мод.

1.3. Получена и исследована геометрооптическая картина поля - каустические поверхности, типы колебаний и соответствующие квантовые условия в рассмотренных замкнутых электродинамических системах.

1.4. Исследована проблема вырождения электромагнитных колебаний в эллипсоидальных резонаторах.

1.5. Показана возможность определения однородных тороидальных мод поллого тороидального резонатора на основе разделения переменных только в уравнении эйконала, и исследованы вопросы проектирования такого резонатора.

1.6. Получены равномерные на границах свет-тень и на оси симметрии асимптотические выражения, описывающие вклад краевых волн (неравномерной части тока на краю рефлектора) в поле излучения осесимметричной параболической антенны.

1.7. Показана возможность получения равномерных на границах свет-тень и на оси симметрии выражений для поля на поверхности двухзеркальной сферической антенны, а также для поля излучения такой антенны при произвольном положении малого корректирующего зеркала (главного луча).

2. Разработаны методы и строгие алгоритмы измерений характеристик антенн и антенных полигонов.

2.1. Разработан и экспериментально подтвержден метод определения коэффициентов разложения поля излучения антенны по сферическим гармоникам, не зависящий от типа измерительного зонда и обеспечивающий исключение влияния побочных излучений или отражений.

2.2. Разработан и испытан алгоритм определения КНД по коэффициентам разложения, минуя процесс восстановления поля излучения антенны.

2.3. Разработаны алгоритмы проведения измерений с помощью неподвижного зонда в зависимости от возможностей поворотного устрой-

ства самой антенны.

2.4. Предложен способ определения фазового центра или центра излучения антенны как центра разложения ее поля по сферическим гармоникам, при котором обеспечивается минимальное число гармоник, привлекаемых для восстановления поля излучения антенны.

2.5. Разработаны и экспериментально испытаны методика и алгоритмы проведения измерений характеристик бортовых антенн ЛА в процессе реального полета с помощью наземной измерительной антенны. Показана предпочтительность горизонтальных прямолинейных траекторий полета ЛА в случае линейной поляризации, а также целесообразность (в определенных случаях) применения метода сферических гармоник для определения характеристик поля излучения ЛА в условиях безэховой камеры.

2.6. Предложены и экспериментально испытаны методы и алгоритмы определения уровня отражения от земли при измерениях характеристик антенн в антенных полигонах (компактных и открытых), основанные на установлении количественной связи между уровнем отраженных полей, попадающих в испытываемую антенну, и величиной отклонения от равномерности распределения поля в ее раскрыве.

2.7. Разработан и апробирован радиологический способ определения пространственного спектра отраженных от окружающих предметов и земли волн.

Апробация работы. Материалы диссертации докладывались на IV (Ереван, 1973г.) и VI (Ростов-на-Дону, 1977г.) всесоюзных симпозиумах по дифракции и распространению волн, XI всесоюзной конференции по распространению волн (Казань, 1975г.), на II Всесоюзной конференции по антенным измерениям (Ереван, 1981г.), на IV всесоюзной конференции по голографии (Ереван, 1982г.), на XIV всесоюзной радиоастрономической конференции (Ереван, 1982г.), на XУIII всесоюзной конференции по радиотелескопам и интерферометрам (Иркутск, 1986г.). Кроме этого, они докладывались на московском семинаре по теории дифракции (руководимом чл.-корр. АН СССР Л.А. Вайнштейном и проф. Я.Н.Фельдом), на теоретических семинарах ВНИИ радиофизических измерений и на семинарах по новым методам ускорения Ереванского физического института, на других всесоюзных семинарах и совещаниях.

Публикация работ. Основные результаты диссертации опубликованы в 39 печатных работах (статьи, два учебно-вспомогательных пособия, доклады), в том числе, в публикациях [1 - 24].

Объем и структура. Диссертация состоит из двух частей, каждая из которых включает три главы, введения, заключения и цитированной литературы. Все главы завершаются выводами к ним. Основной текст диссертации содержит 315 страниц, 40 рисунков и 5 таблиц, список литературы на 19-и страницах, оглавление - на 5-и страницах.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснованы актуальность темы диссертационной работы, ее соответствие специальности "радиофизика", физическая и математическая корректность методов исследования и показана их эффективность; кратко изложено содержание диссертации, при этом подчеркнуты новизна и практическая ценность полученных результатов; сформулированы основные положения, выдвигаемые на защиту.

В первой части диссертационной работы (главы I - 3) развита равномерная коротковолновая асимптотическая теория скалярных и электромагнитных волн для внутренних и внешних задач электродинамики.

В первой главе доказывається, что уравнения Гельмгольца и Максвелла допускают коротковолновые асимптотические решения в произвольной ортогональной системе координат $\{\xi_\ell\}$ ($\ell=1,2,3$). Основные положения построения таких решений сформулированы в §1.1 в виде двух утверждений (теорем) [1,3]. В соответствии с этими утверждениями, если задан набор одномерных "эталонных" функций $f_\ell(\xi_\ell)$, непрерывных вплоть до своих вторых производных и удовлетворяющих линейному дифференциальному уравнению второго порядка

$$\frac{d^2 f_\ell(\xi_\ell)}{d\xi_\ell^2} + d_\ell(\xi_\ell) \frac{d f_\ell(\xi_\ell)}{d\xi_\ell} + \kappa^2 \beta_\ell(\xi_\ell) f_\ell(\xi_\ell) = 0, \quad \kappa = \frac{\omega}{c}. \quad (I)$$

где $d_\ell(\xi_\ell)$ произвольные ограниченные сверху функции, а $\beta_\ell(\xi_\ell)$ - бесконечно дифференцируемые и достаточно медленно меняющиеся

функции в окрестности $\xi_\ell = \tilde{\xi}_\ell$ (уравнение каустических поверхностей - $\beta_\ell(\xi_\ell) = 0$), то равномерные коротковолновые асимптотические решения уравнений Максвелла представляются в виде:

$$\vec{E} = \sum_{i_1, i_2, i_3} \vec{A}^{i_1 i_2 i_3} \prod_{\ell=1}^3 \frac{\chi_\ell^{i_\ell}(\xi_\ell)}{(i\kappa)^{i_\ell}} \frac{d^{i_\ell} f_\ell(\xi_\ell)}{d\xi_\ell^{i_\ell}}, \quad i_\ell \in 0,1, \quad (2)$$

где

$$\vec{A}^{i_1 i_2 i_3} = \sum_n \frac{1}{(i\kappa)^n} \vec{A}_n^{i_1 i_2 i_3}, \quad \chi_\ell^{i_\ell}(\xi_\ell) = \exp\left[i_\ell \int d_\ell(\xi_\ell) d\xi_\ell\right].$$

Амплитуды равномерных асимптотических разложений $\vec{A}_n^{i_1 i_2 i_3}$ и $\vec{D}_n^{i_1 i_2 i_3}$ являются линейными комбинациями геометрических амплитуд $\vec{M}_n^{p_1 p_2 p_3}$, $\vec{N}_n^{p_1 p_2 p_3}$:

$$\vec{A}_n^{i_1 i_2 i_3} = 2^{-3} \prod_{\ell=1}^3 [\sqrt{\beta_\ell(\xi_\ell)} \chi_\ell^{i_\ell}(\xi_\ell)]^{\frac{1}{2} - i_\ell} \sum_{p_1, p_2, p_3} (-1)^{i_1 p_1 + i_2 p_2 + i_3 p_3} \vec{M}_n^{p_1 p_2 p_3}, \quad p_\ell \in 0,1. \quad (3)$$

Амплитуды нулевого приближения $\vec{M}_0^{p_1 p_2 p_3}$, $\vec{N}_0^{p_1 p_2 p_3}$ удовлетворяют геометрическому уравнению переноса, а координатные функции определяются из уравнений эйконала и условия ортогональности.

Вдали от каустических поверхностей решения (2) "расщепляются" на геометрические, если эталонные функции заменить их дебаевскими асимптотиками (§1.2) [1,3,4]:

$$\frac{d^{i_\ell} f_\ell(\xi_\ell)}{d\xi_\ell^{i_\ell}} = \frac{(i\kappa)^{i_\ell} \sum_{p_\ell=0,1} (-1)^{i_\ell p_\ell} e^{i(-1)^{p_\ell} (\kappa \Psi_\ell - \frac{\pi}{4})}}{2 [\sqrt{\beta_\ell(\xi_\ell)} \chi_\ell^{i_\ell}(\xi_\ell)]^{\frac{1}{2} - i_\ell}}, \quad \Psi_\ell = \int \sqrt{\beta_\ell(\xi_\ell)} d\xi_\ell. \quad (4)$$

В §1.3 выведены уравнения эйконала и переноса для скалярных (§1.3.а) и электромагнитных (§1.3.б) полей. Записав геометрические амплитуды для электромагнитной волны (§1.3.б) в виде

$$\vec{M}_0^{p_1 p_2 p_3} = \vec{t}_{p_1 p_2 p_3} \Phi_0^{p_1 p_2 p_3} \sqrt{\epsilon(\vec{r})} + \vec{l}_{p_1 p_2 p_3} \Psi_0^{p_1 p_2 p_3} \sqrt{\mu(\vec{r})}, \quad (5)$$

$$\vec{N}_0^{p_1 p_2 p_3} = \vec{l}_{p_1 p_2 p_3} \Phi_0^{p_1 p_2 p_3} \sqrt{\epsilon(\vec{r})} - \vec{t}_{p_1 p_2 p_3} \Psi_0^{p_1 p_2 p_3} \sqrt{\mu(\vec{r})},$$

с помощью введенных троек взаимно ортогональных векторов

$$[\vec{t}_{R_2 P_2 P_3}, \vec{l}_{R_2 P_2 P_3}] = \frac{\vec{\gamma}_{R_2 P_2 P_3}}{\sqrt{\varepsilon(\vec{r})\mu(\vec{r})}}, \quad \vec{\gamma}_{R_2 P_2 P_3} = \vec{\nabla} \Psi_{R_2 P_2 P_3} = \sum_{\ell=1}^3 (-1)^{\ell} \vec{\nabla} \Psi_{\ell}, \quad (5a)$$

приходим к системе геометрикооптических уравнений переноса относительно скалярных функций $\phi_0^{R_2 P_2 P_3}$, $\psi_0^{R_2 P_2 P_3}$

$$\begin{aligned} 2\vec{\gamma}_{R_2 P_2 P_3} \vec{\nabla} \psi_0^{R_2 P_2 P_3} + \psi_0^{R_2 P_2 P_3} \vec{\nabla} \vec{\gamma}_{R_2 P_2 P_3} - 2\sqrt{\varepsilon(\vec{r})\mu(\vec{r})} T_{R_2 P_2 P_3}^{-1} \phi_0^{R_2 P_2 P_3} &= 0, \\ 2\vec{\gamma}_{R_2 P_2 P_3} \vec{\nabla} \phi_0^{R_2 P_2 P_3} + \phi_0^{R_2 P_2 P_3} \vec{\nabla} \vec{\gamma}_{R_2 P_2 P_3} + 2\sqrt{\varepsilon(\vec{r})\mu(\vec{r})} T_{R_2 P_2 P_3}^{-1} \psi_0^{R_2 P_2 P_3} &= 0 \end{aligned} \quad (6)$$

и радиуса кручения луча $2T_{R_2 P_2 P_3}^{-1} = \vec{l}_{R_2 P_2 P_3} \text{rot} \vec{t}_{R_2 P_2 P_3} + \vec{t}_{R_2 P_2 P_3} \text{rot} \vec{l}_{R_2 P_2 P_3}$, а также к уравнениям эйконалов

$$(\vec{\gamma}_{R_2 P_2 P_3})^2 = \varepsilon(\vec{r})\mu(\vec{r}) = n^2(\vec{r}). \quad (7)$$

Доказательство равномерности асимптотических решений (2) проведено в §1.4 решением уравнений переноса (6) и сводится к условию непрерывности перехода геометрикооптического луча через каустику, а именно, к непрерывности векторов $\vec{t}_{R_2 P_2 P_3}$, $\vec{l}_{R_2 P_2 P_3}$ и угла "вращения" в точке $\xi_e = \tilde{\xi}_e$. Доказательство основано на свойстве бесконечной дифференцируемости функций $\beta_e(\xi_e)$ в окрестности точки $\xi_e = \tilde{\xi}_e$. В §1.5 рассмотрены методологические вопросы построения равномерных разложений [1,3-5].

Во второй главе развитый асимптотический метод применен для решения внутренних задач электродинамики. В §2.1 обоснованы постановка задач, значение и практическая ценность исследуемых в главе проблем. Первая из них - равномерное коротковолновое описание собственных электромагнитных колебаний в цилиндрическом волноводе с радиально-неоднородным заполнением $n^2(r) = \varepsilon(r)\mu(r)$ (световод, §2.2). Эталонными функциями служат: $f_1(\xi_1) = J_m(k\xi_1)$ - функции Бесселя первого рода порядка m ; $f_2(\xi_2) = e^{ik\xi_2}$; $f_3(\xi_3) = e^{ik\xi_3}$ [6]. Из уравнения эйконалов (7) после разделения переменных получаем $\xi_1 = c_3 z$, $\xi_2 = \xi_2 y = \frac{m}{k} y$, а также уравнение связи между координатой ξ_1 и r в цилиндрической системе координат:

$$\sqrt{1 - \left(\frac{m}{k\xi_1}\right)^2} \frac{d\xi_1}{dr} = \sqrt{n^2(r) - \left(\frac{m}{k\xi_1}\right)^2 - c_3^2}$$

Из уравнений переноса определяются геометрикооптические амплитуды (5), уравнение каустической поверхности $r_k = m/k$, являющейся основной волноводу (световоду) цилиндрической поверхностью (линией при $m=0$), а также радиус кручения луча $T_{R_2 P_2 P_3}^{-1}$ и угол

кручения луча χ

$$\chi = \int_{r_k}^r L(r) [n^2(r) - \left(\frac{m}{k\xi_1}\right)^2 - c_3^2]^{-\frac{1}{2}} dr, \quad L(r) = \frac{m c_3 n'(r)}{2 k r n(r)} [n^2(r) - c_3^2]^{-\frac{1}{2}},$$

описывающий изменение поляризации электромагнитной волны вдоль радиуса. Соотношения (3) и конструкция (2) позволяют получить окончательные равномерные выражения для всех компонент электромагнитных полей. Из граничных условий (Дирихле или Неймана) определяются константа c_3 и собственные частоты для двух групп полей, названных условно "Е" или "Н" типами волн, которые при $n(r) = \text{const}$ переходят в соответствующие Е или Н типы волн однородного волновода. Исследуются частные случаи неоднородностей: $n^2(r) = 1 + \alpha r^2$, $n_{1,2}^2 = n^2 \mp (\alpha/k^2)^2$. Каустические поверхности могут оказаться мнимыми (лежащими вне волновода). В случае $n = n_2$ каустика реализуется лишь при достаточно малых значениях константы α [6].

В §2.3 построена асимптотика собственных электромагнитных колебаний в сферическом резонаторе, заполненном средой с показателем преломления $n(r) = \sqrt{\varepsilon(r)\mu(r)}$ [7]. Эталонными в этом случае следует выбрать функции $f_1(\xi_1) = \xi_1 j_n(k\xi_1)$, где $j_n(k\xi_1)$ - сферические функции Бесселя первого рода, $f_2(\xi_2) = P_n^m(\cos \xi_2)$ - присоединенные полиномы Лежандра первого рода и $f_3(\xi_3) = e^{ik\xi_3}$. Геометрооптические амплитуды (5) записываются с помощью пары ортогональных векторов $\vec{t}_{R_2 P_2 P_3}$ и $\vec{l}_{R_2 P_2 P_3}$, связанных с "лучевым" вектором $\vec{\gamma}_{R_2 P_2 P_3}$ через единичный вектор \vec{e}_r соотношением (5a). Из уравнений эйконалов (7) после разделения переменных устанавливаются следующие связи с координатами r, θ, φ в сферической системе координат: $\xi_2 = \theta$, $\xi_3 = \frac{m}{k} \varphi$, $\sqrt{1 - \frac{n(n+1)}{k^2 \xi_1^2}} \frac{d\xi_1}{dr} = \sqrt{n^2(r) - \frac{n(n+1)}{k^2 \xi_1^2}}$. Когда $n(r)$ достаточно гладкая функция от r ($n'/n \ll \frac{1}{r}$) из последнего уравнения следует, что $\xi_1 = r n(r)$ (оно обращается в тождество). Фактор $T_{R_2 P_2 P_3}^{-1}$ в уравнениях переноса (6) обращается в ноль, а из решений этих уравнений следует, что каустическими поверхностями являются, $r = r_n$ (r_n - корень уравнения $n^2(r)r^2 - \frac{n(n+1)}{k^2} = 0$) - концентрическая сфера и $\theta = m/\sqrt{n(n+1)}$ - коническая поверхность с вершиной в центре резонатора. Из граничных условий на сфере конструкция (2) будет равномерно описывать все компоненты электромагнитных колебаний внутри резонатора в виде Е и Н типов волн. При $n(r) = 1$

они переходят в точные выражения для E и H типов волн в полном сферическом резонаторе [7].

Исследованию эллипсоидальных резонаторов посвящен §2.4 [8]: в §2.4.а построена равномерная коротковолновая асимптотика решений собственных колебаний в вытянутом и сплюснутом сфероидальных резонаторах, а в §2.4.б – трехосном зеркальном эллипсоиде [8,9]. Во всех трех случаях в уравнении Гельмгольца переменные разделяются, существует точное решение для скалярной волны и проблема сводится к асимптотическому разделению переменных в уравнениях Максуелла. В качестве эталонных функций можно использовать функции, удовлетворяющие уравнению Гельмгольца, а именно: вытянутые (сплюснутые) радиальные $f_1(\xi_1) = R(\xi_1)$ и угловые $f_2(\xi_2) = S(\xi_2)$ сфероидальные функции и $f_3(\xi_3) = e^{\pm i k \xi_3}$ для сфероидальных резонаторов; функции Ламе $f_1(\xi_1) = L(\xi_1)$, $f_2(\xi_2) = L(\xi_2)$, $f_3(\xi_3) = L(\xi_3)$ для зеркального эллипсоида. Уравнения эйконалов (7) превращаются в тождества, если в качестве координатных функций ξ_1 , ξ_2 и ξ_3 использовать сфероидальные (ξ, η, ψ) или эллипсоидальные (x_1, x_2, x_3) координаты и построить геометрооптические амплитуды (5) введением пар ортогональных векторов $\vec{e}_{P_1 P_2 P_3}$ и $\vec{e}_{P_1 P_2 P_3}$, связанных с лучевым вектором $\vec{s}_{P_1 P_2 P_3}$ через произвольный вектор $\vec{z}_{P_1 P_2 P_3}$ (имеющий, в общем случае, компоненты вдоль всех осей в рассматриваемой системе координат). При этом фактор $T_{P_1 P_2 P_3}^{-1}$ обращается в ноль (полые резонаторы). После решения уравнений переноса (6) получаются три группы решений, соответствующих выбору вектора $\vec{z}_{P_1 P_2 P_3}$ вдоль соответствующих координатных осей. Из получаемых геометрооптических решений согласно (2) и (3) конструируются три группы решений, которые справедливы для одной октанты. Однозначность решений во всей полости обеспечивается наложением вытекающих из соотношений симметрии условий на границах октантов, что приводит к уточнению выбора четных или нечетных асимптотик, либо четных или нечетных угловых сфероидальных или эллипсоидальных функций. При этом области получаемых решений ограничиваются требованием существования осциллирующих решений (лучей). Эти области образуются соответствующими каустическими поверхностями и стенками резонатора, на которых налагаются граничные условия. Совокупность налагаемых граничных условий определяет собственные частоты, типы волн (E и H) и типы колебаний, которые могут быть реализованы

при наличии соответствующих каустических поверхностей. Из всех возможных решений с точностью до асимптотических замен

$$[ik\sqrt{\beta_e(\xi_e)}]^{-1} df_e(\xi_e)/d\xi_e \rightleftharpoons f_e(\xi_e)$$

равномерными оказываются две группы решений со своими "квантовыми условиями", что соответствует двукратному вырождению электромагнитных колебаний в эллипсоидальных резонаторах. Квантовые условия аналогичны полученным для скалярной волны Л.А.Вайнштейном и В.П.Быковым. Для электромагнитных колебаний они уточняют четность или нечетность квантовых чисел для E и H типов волн. В вытянутом сфероидальном резонаторе реализуется один тип колебаний, ограниченный сфероидальной каустикой ($\beta(\xi) = 0$) и каустикой в виде двухполостного гиперболического параболоида ($\beta(\eta) = 0$). В сплюснутом сфероиде осуществляется два типа колебаний: аналогичный описанному, а также колебания, ограниченные двумя однополостными гиперболическими параболоидами ($\beta(\eta_1) = 0, \beta(\eta_2) = 0$). В трехосном эллипсоиде реализуются четыре типа колебаний, для которых каустическими поверхностями служат: эллипсоид и двухполостный гиперболический параболоид; эллипсоид и однополостный гиперболический параболоид; однополостный и двухполостный гиперболические параболоиды и, наконец, два однополостных гиперболических параболоида.

В §2.5 рассмотрены собственные электромагнитные колебания в тороидальных резонаторах. Здесь проблема существенно осложняется тем, что переменные ($\xi_1 = \tau, \xi_2 = \sigma, \xi_3 = \psi$) в тороидальной системе координат [10] разделяются лишь в уравнении Лапласа и найти точное решение нельзя уже для уравнения Гельмгольца. В §2.5.а разделение переменных достигается искусственно введенной в резонатор тороидальной неоднородностью. Если рассмотреть резонатор, заполненный средой с параметрами $n = \sqrt{\epsilon'} = (ch\tau - \cos\sigma)/sh\tau$, $\mu = 1$ [10], то для больших значений τ (для больших тороидов) величина $(ch\tau - \cos\sigma)/sh\tau$ достаточно близка к единице и хорошо аппроксимирует полый тороид. С внесением такой неоднородности переменные в уравнении Гельмгольца можно разделить и в качестве эталонных функций выбрать: $f_1(\tau) = P_{n-1/2}^{\sqrt{m^2 - (ka)^2}}(ch\tau)$ – функции тор^а $f_2(\sigma) = C_{2n-1}(\cos \frac{\sigma}{2})$ – полиномы Гегенбауера и функции $f_3(\psi) = \frac{\cos m\psi}{\sin m\psi}$. По лучи образуют каустическую поверхность в виде тороида, причем несоосного исходному. Для данной моды при достаточно большой длине волны ($m > ka$) эта каустика может оказаться мнимой (распо-

ложенной вне резонатора). С увеличением размеров тора несоосность каустики становится все менее значимой [10]. Конструкция (2) позволяет записать равномерную асимптотику в виде Е и Н типов волн после наложения граничных условий на поверхности тора. Примечательно, что вся процедура может быть приложена к случаю неоднородного заполнения более сложного тороидального вида

$$\varepsilon = (ch\tau - \cos\sigma)^2 [\Psi_1(\tau) + \Psi_2(\sigma) + \Psi_3(\varphi)/sh^2\tau],$$

где $\Psi_1(\tau)$, $\Psi_2(\sigma)$, $\Psi_3(\varphi)$ — произвольные аналитические функции. В §2.5.6 при рассмотрении проблемы однородных тороидальных мод ($m=0$) в тороидальном резонаторе [10, II] оказывается целесообразным прибегнуть к "квазиторoidalной" системе координат $\rho = \frac{r}{R}$, θ , φ (r — точка наблюдения в поперечном сечении тора, R — средний радиус тора). Переменные по координате φ в этой системе координат частично разделяются в уравнении эйконала, а при $m=0$ (однородные тороидальные моды) задача становится двумерной, и переменные по θ и по r разделяются полностью. Из решений уравнений эйконала и переноса, записанных для скалярной волны, легко обнаруживается, что эталонными функциями являются теперь $f_1(r) = J_n(kr)$ и $f_2(\theta) = e^{in\theta}$. Если наложить граничные условия на стенках идеально проводящего тороида, то конструкция (2) определит окончательно два — Е и Н типа колебаний. Каустическая поверхность в этом случае является соосной исходному тороиду с радиусом поперечного сечения $r_k = \frac{R}{k}$. В §2.5.а для радиуса несоосной каустической поверхности при $m=0$ получается выражение $r_k^* = \frac{R}{k} \sqrt{1 - \frac{1}{4n^2}}$. Эти два значения (r_k и r_k^*) достаточно близки, особенно для мод с большим значением n . С другой стороны, уже при $n=1$ разница между r_k и r_k^* меньше длины волны и не существенна в пределах применяемой методики. Проведенный анализ показывает, что и квантовые условия, полученные для однородных тороидальных мод двумя различными способами (§§2.5.а, б), для больших тороидов практически совпадают. Методика расчета применима для секториальных тороидов с произвольным центральным углом $\varphi_0 \leq 2\pi$. В §2.5.б исследованы также вопросы, связанные с применением тороидальных резонаторов, возбужденных на однородной тороидальной моде [II]. Подробно рассматривается проблема существования нужной моды в тороидах с круглым и прямоугольным попе-

речными сечениями в отсутствие возможных паразитных мод, исследуются условия возбуждения нужной моды (и типа), их разнесенность по частотам и поляризации. Для этого применен метод последовательных приближений, где в качестве нулевого приближения по $\rho_0 = \frac{r_0}{R}$ (r_0 — радиус поперечного сечения тороида) берутся полученные в §2.5.б выражения. При этом обнаружен эффект снятия вырождения кривизной тора.

В §2.6 обсуждаются особенности асимптотических разложений в задачах о собственных электромагнитных колебаниях. В частности, подчеркнут тот примечательный факт, что во всех случаях, когда имеется точное решение, асимптотические конструкции типа (2) переходят в эти решения.

В третьей главе обсуждаются коротковолновые асимптотики полей излучения осесимметричных зеркальных антенн. В §3.1 обосновывается эффективность применения методов ГТД в их равномерной модификации для уточнения приближения Кирхгофа при больших углах дифракции и для корректного описания и расчета многозеркальных антенных систем. В §3.2 предлагается общая конструкция равномерного описания осесимметричных пучков электромагнитных волн в виде $\vec{E} = \sum \vec{E}_m$ и $\vec{H} = \sum \vec{H}_m$; \vec{E}_m и \vec{H}_m определены согласно (2), где в качестве эталонных выбраны функции $f_1(\xi_1) = e^{ik\xi_1}$, $f_2(\xi_2) = J_m(k\xi_2)$, $f_3(\xi_3) = e^{ik\xi_3}$ [12, 13]. Такие разложения названы фокальными. В §3.3 развита коротковолновая асимптотика электромагнитного поля осесимметричной параболической антенны [14]. Основная идея заключается в том, что на границах свет-тень падающего и отраженного полей асимптотики в приближении Кирхгофа (АПК) и приближения ГТД имеют одинаковый порядок расходимостей и предлагается конструкция

$$\vec{E} = \vec{E}^{ПК} + \vec{E}^{ГТА} - \vec{E}^{АПК} = \vec{E}^{ПК} + \Delta \vec{E}, \quad (8)$$

которая оказывается конечной на указанной границе свет-тень. Для больших углов дифракции $\vec{E}^{ПК}$ и $\vec{E}^{АПК}$ взаимно компенсируют друг друга, и поле излучения антенны описывается в приближении ГТД. $\Delta \vec{E} = \vec{E}^{ГТА} - \vec{E}^{АПК}$ — суть поправка к теории Кирхгофа, учитывающая влияние краевых волн — "неравномерной части тока" на краю рефлектора. Расходимость на оси антенны устраняется "силь-

кой" поправки $\Delta \vec{E}$ с фокальным разложением, предложенным в §3.2, причем отличными от нуля оказываются моды с $m=0, \pm 1, \pm 2$. Проведены расчеты, оценивающие величину поправки в приближении Кирхгофа. Показано, что в области тени облучателя наряду с полем краевых волн в ПК возникает ложное поле, для компенсации которого к выражениям для поля в тени облучателя добавляется величина первичного поля.

В §3.4 разработана методика расчета двухзеркальной сферической антенны (скалярный случай), которая позволяет получить равномерное выражение для полей, создаваемых на сферической поверхности большого зеркала (БЗ) малым (корректирующим) зеркалом (МЗ) для произвольного углового положения последнего [15]. Разрывы на границах свет-тень ГО поля облучателя, освещающего МЗ, и поля, отраженного от него, сглаживаются с помощью дополнительных множителей, содержащих комплексные интегралы Френеля, когда ГО поле отраженной от МЗ волны для каждой точки заменяется полем, отраженным от поверхности кругового конуса касательно к поверхности МЗ в точке отражения. Расходимости на оси МЗ устраняются сшивкой с фокальным разложением осесимметричных полей по функциям Бесселя (§3.2) [15].

Во второй части диссертации (главы 4-6) рассмотрены электродинамические вопросы, связанные с измерениями характеристик антенн.

В четвертой главе развивается метод сферических гармоник. В §4.1 описывается общая методология определения характеристик антенн по результатам измерений на замкнутых (квазизамкнутых) поверхностях, охватывающих антенну в ее ближней зоне. Конкретно рассмотрены принципы построения алгоритмов для плоской, цилиндрической и сферической поверхностей измерений [2]. Подчеркнуты преимущества алгоритма сферической поверхности, основанного на разложении поля излучения антенны по векторным сферическим гармоникам $\vec{E} = \sum a_N \vec{E}_N$, $\vec{H} = \sum a_N \vec{H}_N$, где \vec{E}_N и \vec{H}_N выражаются через сферические функции Ганкеля $h_n^{(m)}(kr)$, присоединенные полиномы Лежандра $P_n^m(\cos \theta)$ и тригонометрические функции $\frac{\cos}{\sin} m\varphi$. Алгоритм метода сферических гармоник сводится к переразложению поля излучения антенны в дальней зоне (переход к асимптотике

$h_n^{(m)}(kr) \sim (-1)^n \frac{e^{ikr}}{r}$ по коэффициентам a_N , определяемым из ближнезонных измерений. При этом существенно, что эти коэффициенты оказываются не зависящими от расстояния.

В §4.2 исследованы свойства ортогональности присоединенных полиномов Лежандра, обеспечивающие так называемую "обобщенную ортогональность" этих функций (см. ниже), а также их поведение при $\theta = 0$, $\theta = \pm \pi$.

В §4.3 рассматриваются несколько способов определения коэффициентов a_N и выбирается способ, основанный на свойствах "обобщенной ортогональности" присоединенных полиномов Лежандра (§4.2), в виде

$$a_N = B_N I_N, \quad B_N = \{2 \operatorname{Re} \int [\vec{E}_N \vec{H}_N^*] d\vec{s}\}^{-1}, \quad I_N = \int [(\vec{E} \vec{H}_N^*) + [\vec{E}_N^* \vec{H}]] d\vec{s}.$$

Показывается, что $I_N = -\frac{4\pi ik}{c} \int \vec{j} \vec{E}_N dv$, где \vec{j} - плотность сторонних токов и только их, содержащихся в объеме v , охватываемом поверхностью измерений [16, 17]. Показывается, что на расстоянии $kr \sim n$ (n - порядок функции Ганкеля) a_N перестают зависеть от расстояния, а при $n \gg \frac{1}{2}$ справедливы неравенства $n < kr < n^2$. Отсюда оценивается необходимое число гармоник, привлекаемых в разложение: $n_{max} = kr_0$, $N_{max} = 2\pi n_{max} = \frac{4\pi^2 r_0}{\lambda}$ (r_0 - радиус сферы измерений) и шаг измерений по θ : $\Delta \theta = \frac{\lambda}{4\pi r_0}$. При достаточно больших радиусах сферы измерений поле антенны носит ТЕМ характер, т.е. $H_\theta = E_\varphi$, $H_\varphi = -E_\theta$ и радиальная составляющая пренебрежимо мала. Показано, что при $kr_0 \sim n$ погрешность такого пренебрежения меньше, чем $1/(kr_0)^2$.

В §4.4, исходя из свойств присоединенных полиномов Лежандра при $\theta = 0$ (§4.2) и функций Ганкеля (§4.3) показывается, что при $\theta = 0$ отличными от нуля в разложении полей являются лишь гармоники с $m=1$. Доказывается теорема о балансе энергии и выводится выражение для КНД антенны в главном направлении ($\theta = 0$) $D(\theta=0) = \frac{1}{\pi} (|\sum A_n|^2 + |\sum B_n|^2) \sum_{n=1}^{N_{max}} |d_n|^2 / K_{nm}$, где $K_{nm} = \frac{2n+1}{n(n+1)} \cdot \frac{(n-m)!}{(n-m)!}$, а A_n и B_n содержат лишь коэффициенты a_N с $m=1$. Погрешность определения КНД, обусловленную конечным числом привлекаемых гармоник (N_{max}) и ограниченностью сектора измерений, предлагается оценить из условия о балансе энергии [16, 18].

В §4.4 разработан также алгоритм определения поляризационных

характеристик поля излучения антенны в методе сферических гармоник, исследованы погрешности этого алгоритма. Проблема геометрии схемы измерений связана с использованием возможностей поворотного устройства антенны и неподвижного зонда в методе сферических гармоник и рассматривается в §4.5. Указано, что идеальным будет поворотное устройство, допускающее вращение антенны вокруг своей оси на угол 2π и склонение от 0 до π . Направив полярную ось сферической системы координат вдоль оси симметрии антенны и отсчитав азимут в плоскости ее раскрыва путем последовательных вращений, можно получить сетку измеренных данных, удобных для непосредственного измерения E_θ и E_φ (H_θ и H_φ) компонент поля излучения. Исследуется широко распространенный случай азимутально-угломестной монтировки, когда платформа антенны осуществляет вращение в горизонтальной плоскости $0 \leq \varphi \leq 2\pi$, а угломестная ось сканирует от 0 до $\pi/2$. Получаются соотношения между компонентами полей E_θ и E_φ и измеренными значениями вертикальной E_{\perp} и горизонтальной E_{\parallel} составляющих: $E_\theta = \chi_1 E_{\perp} + \chi_2 E_{\parallel}$, $E_\varphi = -\chi_2 E_{\perp} + \chi_1 E_{\parallel}$, где χ_1 и χ_2 зависят от θ , φ и от угла γ_0 - угла превышения места установки зонда относительно центра антенны. Доказывается, что при этом полоса на сфере шириной $2\gamma_0$ остается вне наблюдения [16]. В §4.5 разработаны также алгоритмы определения коэффициентов a_N для сферической поверхности, центр которой смещен относительно центра сферы измерений вдоль оси антенны, что позволяет внести новое понятие о центре излучения антенны.

В §4.6 приводится описание алгоритмов и программ обработки результатов измерений на сферической поверхности и их апробирование на модели в виде дифракционного интеграла Кирхгофа, записанного для открытого конца прямоугольного волновода. Ближнее поле рассчитывается на различных расстояниях (различные значения радиуса сферы измерений) от открытого конца волновода, начиная от 10λ до условной границы дальней зоны. Варьируются как шаг "измерений", так и число "узлов" интегрирования для различных секторов измерений; приводятся графики восстановленных диаграмм направленности, иллюстрирующие устойчивость метода к различным возмущениям. Алгоритм определения КНД апробирован на мо-

дели антенны с расчетным значением 29,29 дБ. При значениях параметров измерений $\Delta\theta = 1^\circ$, $\Delta\varphi = 10^\circ$, $\theta_{max} = 60^\circ$ предложенный алгоритм дает значение 29,34 дБ [18].

В §4.7 приводятся результаты экспериментального исследования алгоритмов в случае рупорной антенны (размеры раскрыва $0,20 \times 0,25 \text{ м}^2$; $\lambda = 0,03 \text{ м}$). Параметры измерений: $r = 0,3 \text{ м}$, $\theta_{max} = 40^\circ$, $\Delta\theta = 2^\circ$, $\Delta\varphi = 10^\circ$, $N_{max} = 400$ ($n = 10$, $m = 40$). Сравниваются результаты восстановления с результатами контрольных измерений на плоскости и с измерениями в условиях дальней зоны ($r = 9 \text{ м}$). В области главного лепестка ДН до уровней -25 дБ расхождение между измеренной (на расстоянии 9 м) и восстановленной диаграммами не превышало 2 дБ [16]. Расчетное значение КНД этой антенны равно 25 дБ. Определение КНД по определяемым из эксперимента коэффициентам разложения дает значение 25,42 дБ [18].

В пятой главе рассматриваются вопросы теории измерений параметров бортовых антенн летательных аппаратов (ЛА) в условиях реального полета и связанные с ними методологические вопросы. Методика измерений полей излучения (§1.1) заключается в измерении параметров траектории ЛА, его эволюций и параметров сигнала на выходе наземной образцовой антенны в процессе автосопровождения ею ЛА, выполняющего полет по определенным заданным траекториям. Параметры траектории ЛА - азимут β , угол места ϵ , наклонная дальность до ЛА R - измеряются в наземной базовой системе координат, а эволюции самого ЛА - курс Ψ , крен γ , тангаж α - в, так называемой, "гироскопической" системе координат с осями, параллельными осям базовой, связанной с наземной измерительной антенной. Начало "гироскопической" системы координат выбирается в центре масс ЛА: поле излучения приписывается ЛА в целом, а не какой-либо отдельной бортовой антенне, установленной на нем [19-21].

В §5.2 найдены соотношения между характеристиками поля излучения бортовой антенны ЛА \tilde{F}_θ , \tilde{F}_φ и параметрами F_θ , F_φ , измеряемыми в процессе облета ЛА образцовой измерительной наземной антенной [19]: $\tilde{F}_\theta = F_\theta \cos \eta_0 - |F_\varphi| \sin \eta_0$, $\tilde{F}_\varphi = |F_\varphi| \cos \eta_0 + F_\theta \sin \eta_0$, где η_0 - угол поворота поляризационного базиса гироскопической системы координат в фазовой плоскости волны. Показано, что в общем случае для определения характеристик поля излучения бортовых антенн

при фиксированных параметрах $\varepsilon, \beta, \psi, \delta, \alpha$ необходимо измерить три величины: амплитуды компонент F_θ и F_ψ и разность фаз между ними [19].

В §5.3 разрабатывается методика измерения поляризационных характеристик бортовых антенн ЛА в режиме реального полета и проводится анализ погрешностей метода [20]. Рассматривается вначале случай линейной поляризации. Требования, предъявляемые к параметрам траектории ЛА ($\varepsilon, \beta, \psi, \delta, \alpha, R$) определяются из анализа полученных выражений. Для удобства характеристика направленности разделяется на нижнюю и верхнюю полусферы и правые, левые, продольные и задние сектора. Предлагаются два решения: а) использование эволюции ЛА (по ψ, δ, α) для реализации требуемой точки сектора измерений; б) эволюции выдерживаются малыми, а нахождение заданной точки сектора измерений осуществляется изменением углов места (ε) и азимута (β) ЛА. Показывается, что применение режима а) предъявляет повышение точности к измерителям углов α и δ для реализации требуемого сектора измерений. Рассматривается также случай произвольной поляризации. Проведенная оценка влияния погрешностей измерителей углов $\varepsilon, \beta, \psi, \alpha, \delta$ для малых значений углов α и δ в секторе измерений $0 \leq \varepsilon \leq 50^\circ$ показывает, что погрешность измерения угла поворота плоскости поляризации $\Delta \eta_0 \sim 1,4 \Delta(\alpha, \beta)$, где $\Delta(\alpha, \beta)$ — инструментальная погрешность измерителей углов. При этом для близких к круговой поляризации полей (коэффициент эллиптичности — 0,9) погрешность определения, например, угла ориентации эллипса η оказывается порядка $\eta \sim \Delta \eta + \Delta \eta_0 \sim \pm 25^\circ$ уже при $\Delta \alpha = \pm 3^\circ$. Существенно лучшие результаты достигаются применением метода многократных измерений амплитуды (метод поляризационной диаграммы), если предположить, что за время цикла этих измерений изменение характеристик поля излучения незначительно. Проведенные расчеты показывают, что при коэффициенте эллиптичности 0,9 в этом случае $\Delta \eta \sim 2^\circ$ [20, 21].

В §5.4 исследуются особенности измерения коэффициента усиления бортовых антенн ЛА. Показывается, что измерение следует проводить при максимальном (полном) поляризационном коэффициенте передачи между входами антенн путем измерения этого коэффи-

циента для двух ортогональных поляризаций с использованием полученных в §§4.2, 4.3 соотношений. В случае линейной поляризации при ограничении эволюций ЛА по крену и тангажу ($\alpha \sim \delta \leq 5^\circ$) угол η_0 можно не измерять. Методическая погрешность измерения коэффициента усиления при этом $\sim \sin^2 \eta_0$ [19–21]. Тогда определение коэффициента усиления сводится к измерению величин λ, R , коэффициента усиления бортовой антенны и отношения мощностей на выходе наземной антенны к мощности бортовой для различных значений ε и β .

В последней, шестой главе исследована проблема влияния земли и окружающих предметов при измерении параметров антенн. Во введении к главе (§6.1) после изложения проблематики описаны предложенные пути ее решения в зависимости от типа и назначения антенн.

В §6.2 разработана методика аттестации антенного полигона [22]. Она основана на аппроксимации профиля поверхности полигона кусочно-плоскими участками. При этом существенно отражающими определяются участки, в которых существенным образом уместается первая зона Френеля относительно приемной антенны. Приписывая этим участкам соответствующие свойства шероховатости и определяя уровень отраженного (рассеянного) сигнала, попадающего в испытываемую антенну, оцениваются амплитуды искажения равномерного распределения поля в ее раскрыве. Далее расчетным образом устанавливается количественная связь между амплитудой искажений и величиной отраженного сигнала. Приводятся результаты исследований профиля полигона и определения существенно отражающих участков для двух длин волн (3см и 10см). Амплитуды искажений измеряются с помощью зонда, сканирующего в плоскости раскрыва антенны. Затем вычисляются соответствия между сигналом, регистрируемым зондом и антенной, путем сравнения их диаграмм направленности. Приводятся результаты аттестации конкретного полигона для двух длин волн (3см и 10см) и при различных состояниях почвы (сухой и влажной).

В §6.3 предложена методика измерения сигналов на антенном полигоне путем управления лучом остронаправленной передающей антенны [22], последовательно освещающим существенно отражающие

участки. Измеренные сигналы образуют систему линейных алгебраических уравнений относительно коэффициентов отражений (индикатора рассеяний) каждого участка. Показывается, что методика эффективна, когда число участков невелико, и можно обойтись без регуляризации системы уравнений. Оказывается, что в решение системы не входит диаграмма вспомогательной антенны, информация о которой содержится в измеренных значениях сигналов. Экспериментальные результаты, полученные для одного и того же полигона, количественно согласуются с результатами, полученными в §6.2 [22].

В §6.4 в приближении "частично отражающего фазового экрана" исследовано влияние земли на характеристики больших стационарных антенн, предназначенных для работы с ЛА или с другими внеземными источниками радиоизлучения [23]. Реальную характеристику направленности (ДН) такой антенны представляется в виде суперпозиции ДН в свободном пространстве и ее зеркального отображения, ограничиваясь лишь фазовыми искажениями, вносимыми в это отображение. Сами фазовые искажения моделируются на основании исследования реального состояния и формы почвы. Показано, что при полурине луча, превышающей значение 2ε (ε - угол места источника или положение луча), для антенны с достаточно большим значением КНД влиянием земли следует пренебречь. Так, для антенны с полишириной луча $\sim 10^\circ$, уровнем первого бокового лепестка ДН -30 дБ и КНД 20 дБ погрешность, вносимая пренебрежением влияния земли, составляет 2%. На основании выведенных формул, описывающих искажения сигнала, проводятся измерения с помощью излучающего ЛА, совершающего горизонтальный полет в режиме автосопровождения в направлении антенны. При этом меняется угломестное положение антенны по мере приближения ЛА к антенне, а наблюдаемый уровень осцилляций согласуется с расчетными оценками [23].

В §6.5 предложен и апробирован радиоголографический метод определения отраженных полей, основанный на Фурье-анализе поля излучения передающей антенны на плоской поверхности в области раскрытия [24]. Из соотношений $k^2 - \frac{\partial^2}{\partial z^2} = 0$ и $\text{div} \vec{E} = 0$ ($\text{div} \vec{H} = 0$) следует, что обратное Фурье-преобразование измеренного амплитудно-фазового распределения на плоскости определяет весь спектр плоских волн, регистрируемых антенной. Показывается, что требуемый размер области измерений ("размер голограммы") определяется

из соотношения $\chi_M \geq 0,88 \lambda / |\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2|$, где α_1 и α_2 - суть два ближайших направления распространения двух плоских волн [24]. В тех случаях, когда размер голограммы становится существенно большим ($\chi_M \sim \lambda$), накладывается также требование к длине когерентности для данного полигона, обеспечивающее получение качественной интерференционной картины [24]. Ограничение области измерений приводит к возникновению ложных боковых лепестков вокруг "уширенных линий" отраженных сигналов [24]. Предлагается механизм учета этого эффекта и фильтрации ложных максимумов. Исследования на математических моделях показывают, что влияние ограничения области измерений на определение уровней сигналов пренебрежимо мало уже при $\chi_M \sim 10 \lambda$. Описывается аттестация безэховой камеры: определение уровней и направлений отраженных сигналов [24].

В заключении сформулированы основные результаты работы, указаны области их применения и пути дальнейшего развития исследований проблем, затронутых в диссертации.

Основные результаты работы.

1. Доказано, что равномерные на каустических поверхностях асимптотические решения уравнений Гельмгольца и Максвелла могут быть построены в произвольной ортогональной системе координат, допускающей разделение переменных хотя бы в уравнении эйконала.
2. Получены асимптотические выражения, описывающие электромагнитные поля, типы волн и каустические поверхности в волноводе (световоде) и сферическом резонаторе с радиально-неоднородным заполнением.
3. Получены асимптотические выражения, описывающие электромагнитные поля в полях вытянутых и сплюснутых сфероидальных резонаторах и в зеркальном трехосном эллипсоиде. Выведены и исследованы квантовые условия, определяющие собственные частоты этих резонаторов, реализуемые каустические поверхности и типы волн возможных колебаний (для E и H типов волн). Исследована проблема вырождения собственных колебаний в этих резонаторах.
4. Получены асимптотические выражения для скалярных и электромагнитных полей в тороидальном резонаторе с неоднородным

тороидальным заполнением и в полости тороида для однородных тороидальных мод. Методом последовательных приближений исследован эффект снятия вырождения кривизной тора.

5. Разработана равномерная асимптотическая теория осесимметричных зеркальных антенн, уточняющая приближение Кирхгофа и расширяющая пределы его применимости.

6. Разработаны теория и алгоритмы измерений характеристик антенн в ближней зоне на сферической поверхности, эффективно решающие проблему устранения искажающего влияния посторонних излучений и отражений от окружающих предметов и земли, определения поляризационных, интегральных и других характеристик антенн.

7. Создана методика измерений характеристик бортовых антенн ЛА в условиях реального полета, позволяющая по разработанным строгим алгоритмам измерений полностью характеризовать поле излучения бортовой антенны с ЛА, определить коэффициент усиления (или его диаграмму) в проводимом секторе измерений, а также решить методологические вопросы.

8. Созданные методы определения влияния земли на результаты измерений характеристик антенн дают достоверные, но качественные оценки пригодности данного полигона. В проблеме аттестации антенных полигонов и безэховых камер по вторичным отражениям предложен новый перспективный метод разложения отраженных полей в спектр плоских волн (радиологический метод), исчерпывающе описывающий картину поля на антенном полигоне.

Таким образом, в диссертационной работе разработаны основы новых направлений в радиофизике по специальности 01.04.03, ориентированные на решение внутренних и внешних задач электродинамики квазиоптических устройств и на создание новых методов решений актуальных проблем измерений параметров антенн.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Газазян Э.Д. Основы геометрической оптики (ГО) и геометрической теории дифракции (ГТД).— Учебно-вспомогательное пособие (на арм. языке). Изд-во ЕРГУ, Ереван, 1989, 100с.
2. Газазян Э.Д. Анализ и синтез антенных систем (вопросы теории

- расчета и измерений параметров антенн).— Учебно-вспомогательное пособие (на арм. языке). Изд-во ЕРГУ, Ереван, 1983, 123с.
3. Газазян Э.Д., Иванян М.И. Равномерные коротковолновые асимптотические решения уравнений Гельмгольца и Максвелла.— Радиотехника и электроника, 1984, т.29, №5, с.830-835.
 4. Газазян Э.Д. Равномерная коротковолновая асимптотика скалярных и электромагнитных полей на основе одномерных эталонных функций.— Препринт ЕрФИ 1092(55)-88, ЦНИИАтоминформ, Ереван, 1988, 44с.
 5. Газазян Э.Д., Иванян М.И. Асимптотическое разделение переменных в уравнениях Максвелла для неоднородной среды.— В кн.: УП Всесоюзный симпозиум по теории дифракции и распространению волн. Краткие тезисы. Роатов-на-Дону. т. I, 1977, с.78-81.
 6. Газазян Э.Д., Иванян М.И., Тер-Погосян А.Д. Равномерная коротковолновая асимптотика собственных электромагнитных колебаний в круглом цилиндрическом волноводе с аксиально-симметричным заполнением.— Препринт ЕрФИ 886(37)-86, ЦНИИАтоминформ, Ереван, 1986, 8с.
 7. Газазян Э.Д., Иванян М.И. Коротковолновая асимптотика полей в замкнутой сферической области с неоднородным заполнением.— Изв. АН Арм.ССР, Физика, 1976, т. II, №4, с.259-267.
 8. Газазян Э.Д. О собственных электромагнитных колебаниях в эллипсоидальных резонаторах.— Препринт ЕрФИ 1055(18)-88, ЦНИИАтоминформ, Ереван, 1988, 38с.
 9. Газазян Э.Д., Иванян М.И. Коротковолновая асимптотика электромагнитного поля внутри замкнутого эллипсоида.— Радиотехника и электроника, 1976, т.21, №10, с.2052-2061.
 10. Газазян Э.Д., Иванян М.И., Тер-Погосян А.Д. О собственных электромагнитных колебаниях в тороидальном резонаторе.— Препринт ЕрФИ 887(38)-86, ЦНИИАтоминформ, Ереван, 1986, 8с.
 11. Газазян Э.Д., Кочарян В.Г., Оксюзян Г.Г. Тороидальные резонаторы с прямоугольным и круглым поперечными сечениями.— Препринт ЕрФИ 1145(22)-89, ЦНИИАтоминформ, Ереван, 1989, 37с.
 12. Газазян Э.Д., Кинбер Б.Е. Асимптотика осесимметричных пучков электромагнитных волн.— Изв. ВУЗов - Радиофизика, 1971, т.14, №8, с.1219-1223.
 13. Газазян Э.Д., Тер-Погосян А.Д. Описание полей осесимметричных

- пучков электромагнитных волн вблизи каустической поверхности в неоднородной диэлектрической среде.- Изв. АН Арм.ССР, Физика, 1974, т.9, №2, с.169-172.
14. Газазян Э.Д., Иванян М.И., Кинбер Б.Е. Равномерная коротковолновая асимптотика поля параболической антенны.- Изв. АН Арм.ССР, Физика, 1978, т.13, №2, с.87-95.
15. Газазян Э.Д., Иванян М.И., Качатрян А.А., Тер-Антонян Р.В. К дифракционной теории двухзеркальных сферических антенн. - В кн.: XVIII Всесоюзная конференция по радиотелескопам и интерферометрам. Тезисы докладов.-Иркутск, 1986, ч.2, с.205-206.
16. Асатрян Д.Г., Газазян Э.Д. О методе сферических гармоник в теории измерений характеристик антенн.- Изв. ВУЗов - Радиофизика, 1986, т.29, №1, с.121-124.
17. Газазян Э.Д., Иванян М.И. К теории измерений характеристик антенн методом сферических гармоник. - Изв. ВУЗов - Радиофизика, 1987, т.30, №10, с.1221-1225.
18. Асатрян Д.Г., Газазян Э.Д. О методе сферических гармоник в теории измерений характеристик антенн. II. - Изв. ВУЗов - Радиофизика, 1988, т.31, №2, с.247-248.
19. Геруни П.М., Газазян Э.Д., Панченко В.Г. Измерение характеристик поля излучения бортовых антенн летательных аппаратов. - Метрология (ежемесячное приложение к журналу "Измерительная техника"), 1983, №11, с.49-54.
20. Газазян Э.Д., Панченко В.Г. Измерение поляризационных характеристик поля излучения бортовых антенн. Там же, 1984, №7, с.44-49.
21. Газазян Э.Д., Панченко В.Г. О погрешностях определения координат при измерениях характеристик бортовых антенн. - Измерительная техника, 1984, №9, с.54-56.
22. Газазян Э.Д., Тагворян Э.С. Определение уровня отраженных от земли сигналов на антенных полигонах.- Изв. АН Арм.ССР, Физика, 1986, т.21, №3, с.150-154.
23. Газазян Э.Д., Панченко В.Г., Тагворян Э.С. К определению влияния подстилающей поверхности на результаты измерения характеристик больших антенн.- Радиотехника и электроника, 1988, т.33, №4, с.696-699.
24. Газазян Э.Д., Панченко В.Г., Тагворян Э.С. О радиогологра-

фическом методе аттестации антенных полигонов.- Изв. АН Арм.ССР, Физика, 1987, т.22, №4, с.209-214.

Кроме этого, в диссертации использованы материалы, опубликованные еще в 15 работах автора.

Э. Газазян