

1 Основы математической теории анализа и синтеза зеркальных антенн

В широко известной литературе по анализу антенных систем зеркального типа, включая монографии [1.1–1.3], предложен ряд моделей и сформированных на их основе методов расчета характеристик направленности. Последние ориентированы на решение задач электродинамического анализа и синтеза зеркальных антенн и, как правило, основываются на комбинированном использовании следующих подходов [1.2]: эмпирических методов; скалярном представлении электромагнитного поля в апертуре и теории преобразования Фурье; векторном представлении процессов дифракции в антенне. При этом сами авторы работ отмечают, что «... применимость каждого конкретного метода...» и определенный порядок их комбинирования «... определяется спецификой решаемой задачи...» [1.1, с.4].

Определение рациональных подходов, методов и способов анализа зеркальных антенн в задачах параметрического (задание амплитуд и фаз токов возбуждения антенны) и структурного (определение координат расположения элементов антенны и ее других конструктивных параметров) синтеза с применением современных ЭВМ для обеспечения заданных характеристик излучения предполагает предварительную систематизацию знаний и фактов в рассматриваемой предметной области, анализ существующих средств, выявление основных противоречий и проблем анализа и синтеза.

В соответствии с указанными задачами в данной главе изложение материала выполнено в следующем порядке: первоначально рассмотрены направления развития теории и практики построения антенн зеркального типа, затем основные характеристики направленности антенных систем зеркального типа, далее методы анализа и синтеза зеркальных антенн, проблемы анализа и синтеза зеркальных антенн при реализации вычислений на ЭВМ.

1.1. Направления развития теории и практики построения антенн зеркального типа

Исторически развитие теории антенных систем зеркального типа тесно связано со становлением отечественной науки. В терминологическом и содержательном аспектах теория антенных систем

зеркального типа как категория отечественной науки раскрыта в начале 20-х гг. XX столетия. Становление теории как самостоятельной области знаний приходится на конец 50-х — начало 60-х годов. К этому времени в основном уже был обобщен опыт проведения конструкторско-технологических изысканий в данной области и на качественном уровне произведена оценка роли известных методов анализа и синтеза простейших антенн зеркального типа как взаимных устройств.

С появлением новых технологий в конструктивных решениях средств радиосвязи, системных методов организации и ведения многоканальной радиосвязи обозначился определенный разрыв между техническими требованиями к разрабатываемым комплексам связи и заявляемыми характеристиками зеркальных антенн (ЗА) как составляющих данных комплексов. В этот период определяющей тенденцией развития теории и практики разработки ЗА является переход от совокупности частных решений к комплексным способам. Большая часть исследований выполнена после 70-х гг. XX в. [1.1—1.7].

Таким образом, несмотря на давнюю известность принципиальной возможности использования зеркал для передачи энергии на расстояние, теория ЗА является достаточно молодой и бурно развивающейся областью знаний. Интерес к ней связан прежде всего с растущими потребностями информационных систем в большей пропускной способности и как следствие с переходом в высокочастотные диапазоны волн, в которых принципиальная простота антенных устройств, возможность получения высокой направленности и энергетики, сохранение этих свойств в широком диапазоне частот при малых потерях и возможность управления характеристиками излучения на первый план выводят именно зеркальные антенные системы. За последние тридцать лет ЗА прошли путь от простых взаимных устройств до сложных технических систем (рис. 1.1).

Классификация ЗА по данной схеме выполнена с целью рассмотрения общей задачи проектирования антенных систем (АС) зеркального типа, определения области, места и роли разрабатываемых элементов теории синтеза среди общих методов анализа и синтеза АС. При этом, по существующим взглядам [1.4] проблема синтеза антенных систем, включая и многофункциональные антенные системы зеркального типа, делится на две части — теоретическую и конструктивно-технологическую.

В свою очередь, теоретическую часть принято разделять на внутреннюю и внешнюю задачи электродинамики, принимающие глобальный, общетеоретический характер в практике построения ан-

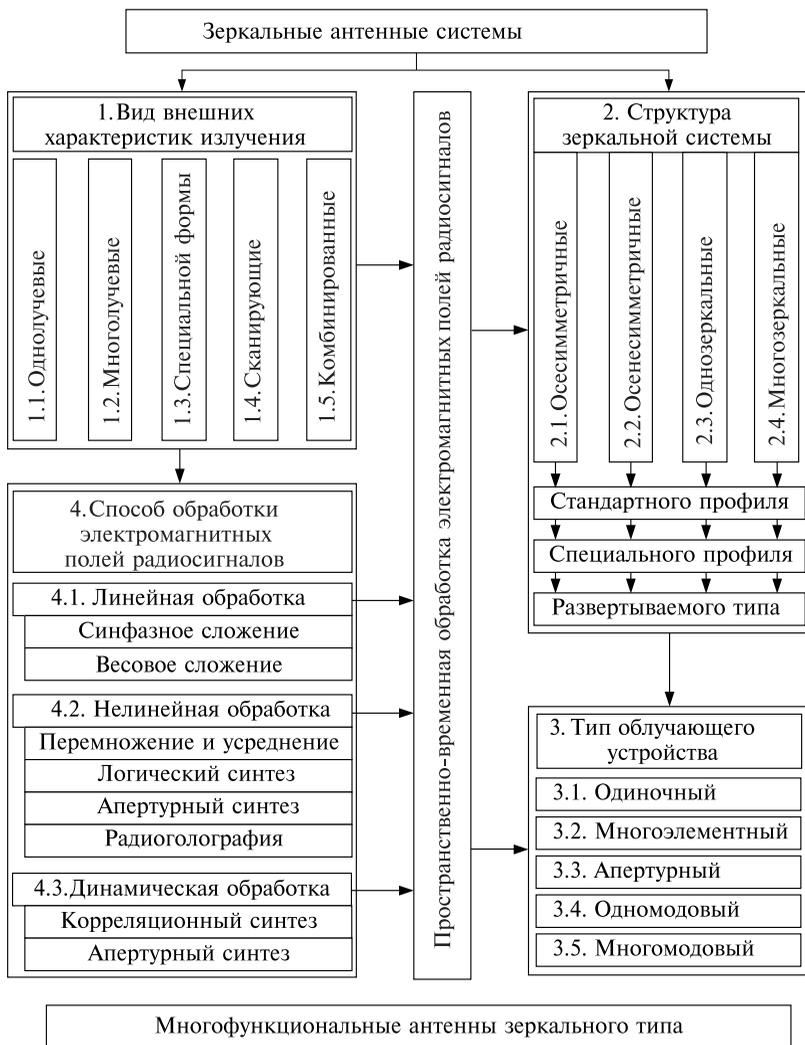


Рис. 1.1. Классификация зеркальных антенных систем

тенных систем. Принципиальная возможность независимого подхода к синтезу антенн, с точки зрения решения проблем внешней и внутренней задач электродинамики, объективно привела к формированию двух основных направлений в теории синтеза антенных систем, наиболее ярко проявившихся в теории антенных решеток:

1) формированию токов или полей по законам, обеспечивающим требуемые характеристики направленности излучения в дальней зоне антенны;

2) электродинамической оптимизации устройств возбуждения и распределения энергии сигналов как элементов структуры антенной системы.

В практике ЗА данные направления выразились в поиске:

1) конструкций зеркальных систем и методов анализа их характеристик [1.5, 1.7] с целью оптимизации параметров АС по заданным требованиям;

2) облучающих устройств и методов их разработки [1.5—1.7] как элементов АС, обеспечивающих требуемую энергетическую эффективность.

Развитие радиотехнических систем наблюдения за движущимися объектами и техники многоканальной радиосвязи, особенно спутниковых систем связи, потребовало совершенствования и антенных систем зеркального типа [1.6]. Разнообразие исходных характеристик синтеза, требований к помехозащищенности, направленности, диапазонным свойствам, поляризации поля излучения, временным характеристикам управления параметрами объективно привело к появлению многофункциональных антенных систем зеркального типа на базе гибридных зеркальных антенн.

Объединение зеркальной системы (в общем случае многозеркальной) с облучающей антенной решеткой излучающих элементов в гибридной зеркальной антенне (ГЗА) позволило расширить число степеней свободы, реализовать новые возможности в формировании многолучевых и сканирующих диаграмм направленности, обеспечить потенциальную возможность пространственно-временной обработки электромагнитных полей радиосигналов. Однако появление новых дополнительных положительных свойств ГЗА привело к разрыву в теории и практике синтеза ЗА, а именно к появлению следующих основных проблем при разработке многофункциональных антенных систем на основе ГЗА:

1) определение оптимального положения фазового центра облучателя в фокальной области, при котором обеспечиваются наибольшая симметрия луча, высокий коэффициент усиления (КУ) антенны и низкий уровень боковых лепестков диаграммы направленности (ДН) по сравнению с другими положениями с той же ориентацией луча и связанного с ним геометрического места оптимальных положений;

2) определение размера, оптимальной формы и выбор числа элементов, формирующих один или несколько лучей многолучевой диаграммы направленности;

3) выбор оптимальной геометрии и взаимного размещения отражающих поверхностей и облучающей решетки — оптимизация ком-

поновки, необходимая для расширения пределов сканирования и уменьшения размеров облучателя, а также упрощения его фидерного тракта;

4) расчет профилей отражающих поверхностей — синтез зеркальной системы по заданным параметрам распределения мощностного излучения в пространственной зоне;

5) синтез амплитудно-фазового распределения многоэлементного облучателя — определение амплитуд и фаз токов, возбуждающих излучатели кластеров облучающей антенной решетки (ОАР), исходя из требуемого коэффициента направленного действия (КНД) антенны в направлении излучения;

6) реализация максимально возможной эффективности антенны в секторе сканирования путем минимизации фазовых искажений в раскрыве главного зеркала и учета реального фазового фронта поля, создаваемого ОАР;

7) расчет электрических характеристик ЗА, усложнение которых вызвано необходимостью учитывать особенности геометрии антенной системы и сложностью определения поля многоэлементного облучателя.

Существующие методы решения рассмотренных проблем лежат в различных областях знаний, накопленных в процессе развития науки, техники и технологии конструкторских разработок. Построение взаимоувязанной теории, характеризующейся зависимостью одних элементов от других и выводимостью содержания теоретических конструкций по определенным методологическим правилам, возможно на основе исходного базиса подтвержденных практикой понятий, утверждений и аксиом электродинамики, теории антенн, теории обработки сигналов, обнаружения, оценок, управления и адаптивного поиска. Взаимосвязь теорий и методов анализа и синтеза антенных систем зеркального типа, образующих исходный базис, показана на рис. 1.2. Как видно, многообразие методов велико, а сами методы специфичны, и даже их краткий обзор вряд ли уместен, тем более что существует достаточно публикаций именно обзорного плана [1.4]. Вместе с тем к настоящему времени известен довольно широкий спектр направлений, приемов и вариантов анализа и синтеза зеркальных антенн, которые сведены к нескольким основным методам: геометрической оптики (методы К. А. Green, V. Galindo, W. F. Williams, P. J. B. Clarricoats, C. T. R. C. Salema); аппроксимации и интегрального уравнения баланса энергий (методы Л. Д. Бахраха, Г. К. Галимова); последовательной дифракционной оптимизации (метод Р. J. Wood); вариационного исчисления (метод G. T. Poulton).

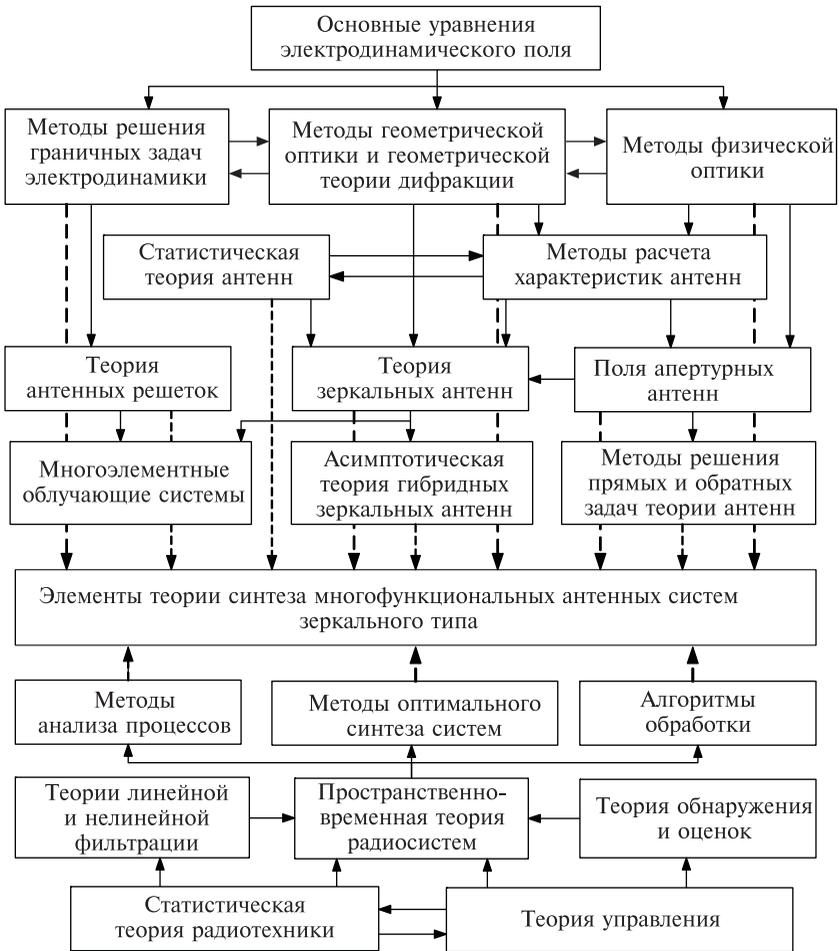


Рис. 1.2. Основные методы анализа и синтеза зеркальных антенн

Перечисленные методы предложены сравнительно недавно и отражают развитие идеи комплексности решения проблемы синтеза ЗА. Одним из основных стимулов развития теории и практики конструктивно-технологической разработки ЗА является наличие постоянного дефицита пропускной способности, устойчивости, мобильности и надежности связи.

В условиях бурного развития вычислительной техники и информационных технологий особой актуальностью обладают вопросы моделирования, анализа и синтеза ЗА, связанные с численными методами многопараметрического перебора на ЭВМ в пределах заданных степеней свободы варьируемых параметров зеркальной и облучаю-

щей систем. Основу разрабатываемых оптимизационных решений составляет постановка экстремальных задач по критериям, определяющим максимум/минимум основных характеристик направленности антенных систем зеркального типа.

Основу данных моделей составляет решение задачи излучения и распространения электромагнитных полей заданными токами и зарядами как в различных средах, так и в присутствии направляющих, или канализирующих, устройств.

1.2. Уравнения электромагнитного поля для произвольной системы источников и отражателей

Для наиболее полного понимания физических процессов излучения ЭМП антенной системой зеркального типа сформируем эту задачу в следующем общем виде.

Задана некоторая произвольная изотропная и однородная область Ω , ограниченная системой поверхностей произвольной формы S_0, S_1, \dots, S_N (рис. 1.3). Пусть внутри заданной области Ω дано произвольное распределение сторонних источников ЭМП, которыми в общем случае могут быть как электрические, так и магнитные токи и заряды $\mathbf{J}, \rho, \mathbf{J}_M, \rho_M$. Требуется найти величину электромагнитного поля, т. е. векторы \mathbf{E}_Q и \mathbf{H}_Q в произвольной точке Q , расположенной внутри области Ω .

Решение указанной задачи определяется из общих законов для электромагнитных процессов, выраженным в виде системы дифференциальных уравнения (уравнений Максвелла, записанных в диф-

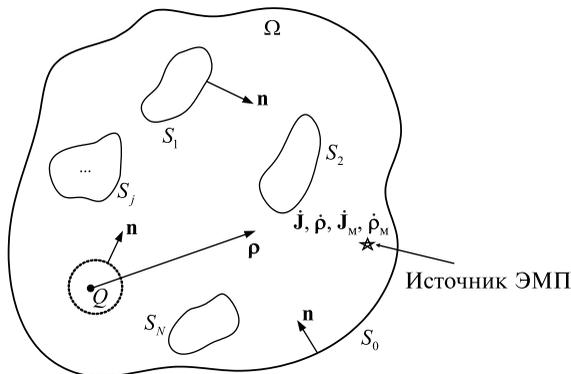


Рис. 1.3. Ограниченная область анализа Ω с произвольным распределением источников ЭМП [1.8]