

# Предисловие

65-летию Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики посвящается.

Характерной чертой интенсивно развивающейся отрасли инфокоммуникаций является возрождающийся интерес к радиотехнологиям, который характерен для различных сфер экономики. Радиолокация, радионавигация, радиочастотная идентификация, беспроводный доступ, новые виды радиосвязи и радиовещания — эти технологии сопровождаются излучением электромагнитной энергии в открытое пространство и ее приемом. В связи с этим для радиоинженеров стало целесообразным не только повышение уровня подготовки по соответствующим компетенциям, но и введение специализации в области антенн и распространения радиоволн.

Настоящее учебное пособие предназначено для самостоятельной работы по дисциплине «Распространение радиоволн и антенно-фидерные устройства» бакалавров направления «Инфокоммуникационные технологии и системы связи». Цель пособия — формирование компетенций, в рамках которых обучающийся должен знать: требования к антеннам и их параметры, физические основы работы антенн, классификацию радиочастот (радиоволн), специфику распространения радиоволн с учетом влияния окружающей среды; уметь: рассчитывать характеристики направленности одиночных излучателей, дискретных антенных решеток и возбужденных поверхностей (апертур), вычислять их коэффициент направленного действия (коэффициент усиления), а также оценивать основные потери при работе радиолиний в различных условиях.

Отдельные фрагменты и разделы пособия вполне могут быть использованы при подготовке бакалавров и специалистов по направлениям, включающим радиотехнологии, например «Радиотехника», «Информационная безопасность телекоммуникационных систем».

При написании книги авторы использовали свой опыт преподавательской работы в Поволжском государственном университете телекоммуникаций информатики (ПГУТИ), а также опыт научной работы в Самарском филиале ФГУП НИИР — СНИИР.

Структура построения всех глав одинаковая — излагаются теоретические сведения, формулируются вопросы для самопроверки, приводятся задачи и примеры решения. Указаны ссылки на источники из списка литературы, где ряд вопросов рассматривается более подробно.

Содержание пособия представляет собой нечто среднее между конспектом отдельных лекций и задачником и может быть определено как руководство к расчетам по основам теории антенн и распространения радиоволн.

Авторы не пошли по пути размещения перед набором задач в каждой главе набора формул, стимулирующих студентов к подбору удачных подстановок. Использование теоретических сведений способствует формированию элементов творческого подхода, основанного на понимании физической картины рассматриваемых процессов излучения, приема и распространения радиоволн.

Авторы с искренней благодарностью вспоминают заслуженного деятеля науки и техники СССР, лауреата Государственных и Ленинской премий, доктора технических наук, профессора Григория Захаровича Айзенберга, кандидата технических наук, профессора Евгения Юрьевича Шерedyкo и ныне здравствующего доктора технических наук Льва Серафимовича Казанского, которые заложили основу Самарской антенной школы в ПГУТИ и СОНИИР и воспитали плеяду ученых и педагогов, успешно продолжающих развивать тематику «Антенны и распространение радиоволн» как современное образовательное и научное направление.

# 1 Антенны и фидеры — назначение и параметры

---

## 1.1. Обобщенная структурная схема линии радиосвязи

В процессе организации связи, звукового и телевизионного вещания широко применяются радиосредства, обеспечивающие излучение и прием радиоволн. Простейшая структурная схема линии радиосвязи приведена на рис. 1.1. Элементами схемы являются: радиопередатчик, фидер передающей антенны, передающая антенна, приемная антенна, фидер приемной антенны и радиоприемник.

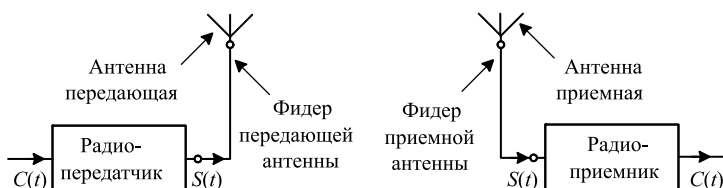


Рис. 1.1. Структурная схема линии радиосвязи

Рассмотрим в общих чертах работу линии радиосвязи. Исходный (первичный) сигнал электросвязи  $C(t)$ , отображающий передаваемое сообщение, поступает на вход радиопередатчика. В радиопередатчике происходит его преобразование в радиочастотный сигнал  $S(t)$ . Этот сигнал по специальной электрической цепи, называемой фидером, подводится к передающей антенне — устройству, предназначенному для радиоизлучения.

Весьма малая часть энергии радиоволн, излученных передающей антенной, достигает приемной антенны и возбуждает в ней слабый радиочастотный сигнал  $S(t)$ . Этот сигнал по фидеру приемной антенны подается на вход радиоприемника, где происходит его обработка вплоть до формирования копии исходного сигнала электросвязи  $C(t)$ .

Реальный процесс радиоприема гораздо сложнее — это связано с тем, что радиоприемное устройство решает задачу выделения полезного радиосигнала в условиях действия помех различной природы. Радиосвязь принципиально невозможна без использования радиоволн и, следовательно, таких устройств, которые обеспечивали бы

их излучение и прием. Эти функции выполняют антенны. В соответствии с [1] передающая антенна — это устройство, предназначенное для излучения электромагнитных волн, а приемная антенна — это устройство, служащее для приема электромагнитных волн.

Фидер определяется как электрическая цепь и вспомогательные устройства (они не показаны на рис. 1.1), с помощью которых энергия радиочастотного сигнала подводится от радиопередатчика к антенне или от антенны к радиоприемнику. При этом в [1] обращается внимание на недопустимость применения вместо сертифицированного термина «фидер» терминов-синонимов: «фидерная линия», «линия передачи», «волноводный тракт».

В фидерах радиочастотные сигналы распространяются в виде направляемых электромагнитных волн, которые связаны с зарядами и токами. В открытом пространстве излученные электромагнитные волны становятся свободными — радиоволнами. Таким образом, на передающей стороне линии радиосвязи передающая антенна преобразует связанные электромагнитные волны в свободные электромагнитные волны — радиоволны. На приемной стороне линии радиосвязи происходит обратный процесс. Приемная антенна преобразует радиоволны в связанные электромагнитные волны, которые по фидеру подаются на вход радиоприемника.

Почти вся энергия радиоволн, излученных передающей антенной, поглощается средой, в которой она распространяется, а также различными препятствиями. Приемной антенне удастся уловить из окружающей среды ничтожную часть той энергии, которая излучена передающей антенной. Тем не менее в правильно спроектированной линии радиосвязи энергии, принятой антенной, вполне достаточно для качественной работы радиоприемника.

## 1.2. Общие требования, предъявляемые к антеннам и фидерам

Исходя из рассмотренных принципов работы линии радиосвязи, можно сформулировать общие требования, предъявляемые к фидерам и антеннам. Следуя схеме, приведенной на рис. 1.1, последовательно рассмотрим фидер передающей антенны, передающую антенну, приемную антенну и фидер приемной антенны.

Очевидное требование к фидеру передающей антенны — передача энергии от выхода радиопередатчика до входа антенны с минимальными потерями. Специфическое требование — фидер не должен обладать заметным антенным эффектом. Под антенным эффектом фидера передающей антенны понимают его способность

формировать нежелательное радиоизлучение, которое может ухудшить параметры передающей антенны.

Сформулируем основные требования к передающей антенне. Первое — преобразовать электромагнитную энергию, поступающую на её вход, в энергию радиоволн с минимальными потерями. Второе — обеспечить необходимую пространственную концентрацию излучаемой энергии, т. е. направленность. Третье — обеспечить (совместно с радиопередатчиком) в месте приема необходимую напряженность электромагнитного поля. Четвертое — обеспечить заданную пространственно-временную ориентацию (поляризацию) векторов напряженности электромагнитного поля радиоволн.

Следует обратить внимание на не совсем очевидные, но тем не менее очень важные требования, имеющие прямое отношение как к фидеру, так и к антенне. Первое — фидер и антенна по отношению к радиопередатчику являются нагрузкой. Следовательно, эта нагрузка должна быть такой, чтобы обеспечивался эффективный режим работы радиопередатчика. Второе — дальность действия линии радиосвязи, кроме прочих факторов, зависит и от излучаемой антенной мощности. В некоторых случаях мощность на входе антенны настолько велика, что возникает реальная угроза механического разрушения отдельных элементов антенны или фидера вследствие электрического пробоя или теплового перегрева. Чтобы избежать таких разрушений, и фидер, и антенна должны обладать определенной электрической прочностью. Третье — фидер и антенна должны нормально функционировать в заданном диапазоне частот или длин волн.

Наряду с требованиями технического характера, перечисленными выше, к передающим антеннам и фидерам предъявляются требования иного плана: технологичности изготовления, удобства и безопасности эксплуатации, электромагнитной безопасности (экологической чистоты).

Далее рассмотрим требования к приемной антенне и её фидеру. Основные требования, предъявляемые к приемной антенне, следующие. Первое — обеспечить необходимую пространственную избирательность (направленность), т. е. способность преимущественного приема радиоволн, приходящих с определенных направлений. Направленные приемные антенны, в сравнении с ненаправленными, в общем случае обеспечивают на входе приемника более высокое отношение мощности радиосигнала к мощности помех. Последнее является важнейшим условием качественного радиоприема. Второе требование к приемной антенне — обеспечить преимущественное реагирование на радиоволны определенного вида поляризации.

Основные требования, предъявляемые к фидеру приемной антенны, следующие. Во-первых, передача энергии между антенной и входом радиоприемника должна осуществляться с малыми потерями. Во-вторых, фидер не должен обладать заметным антенным эффектом. Под антенным эффектом фидера приемной антенны понимают его способность принимать радиосигнал, что может ухудшить параметры собственно приемной антенны. Требование на степень проявления антенного эффекта в фидерах приемных антенн более жесткое, чем в фидерах передающих антенн.

Важно уяснить, что приемная антенна по отношению к радиоприемнику выступает в роли эквивалентного генератора, нагрузкой которого служит входное сопротивление фидера, подключенного к входным цепям радиоприемника. Следовательно, еще одно требование как к приемной антенне, так и её фидеру состоит в том, чтобы во входных цепях радиоприемника выполнялись условия выделения радиосигнала максимальной мощности.

Приемная антенна и её фидер должны обеспечивать возможность нормального функционирования линии радиосвязи в заданном диапазоне частот или длин волн.

Наряду с требованиями технического характера к приемным антеннам и фидерам предъявляются определенные требования иного плана — технологичности изготовления, защиты от грозовых разрядов, удобства и безопасности эксплуатации и др. Требования электрической прочности и экологической чистоты отсутствуют, поскольку мощность сигнала в приемной антенне и её фидере очень незначительна.

Рассмотренные требования к антеннам и фидерам являются основными для большинства радиосредств, используемых в радиосвязи, радиовещании и телевидении. Почти каждый класс антенн и фидеров, применительно к их назначению, характеризуется ещё рядом дополнительных требований, с которыми знакомятся уже в дальнейшем в процессе изучения соответствующих разделов полного курса по антенно-фидерным устройствам.

### 1.3. Параметры передающих антенн

#### 1.3.1. Коэффициент полезного действия

Обратимся к схеме радиолинии, приведенной на рис. 1.2. На передающей стороне точка 1 схемы соответствует выходу передатчика (входу фидера). Через  $P_1$  обозначена мощность радиочастотного сигнала на выходе передатчика (входе фидера). Точка 1' соответствует выходу фидера (входу передающей антенны). Через  $P'_1$

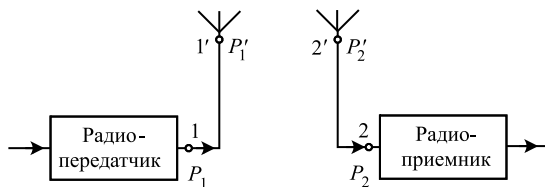


Рис. 1.2. Структурная схема радиолинии

обозначена мощность радиочастотного сигнала на выходе фидера (входе передающей антенны).

Реальные антенны выполняются из проводов или металлических поверхностей с конечной проводимостью или из диэлектрика, обладающего потерями. Поэтому не вся мощность радиочастотного сигнала  $P'_1$ , подводимая к антенне, преобразуется в мощность излучения  $P_\Sigma$ . Часть подводимой мощности выделяется в виде тепла в антенне.

Коэффициентом полезного действия (КПД) антенны  $\eta_a$  называется отношение мощности радиоизлучения, создаваемого антенной, к мощности радиочастотного сигнала, подводимого к её входу:

$$\eta_a = P_\Sigma / P'_1 = P_\Sigma / (P_\Sigma + P_{\text{п}}),$$

где  $P_{\text{п}}$  — мощность потерь в антенне.

### 1.3.2. Амплитудные характеристики и диаграммы направленности

Под направленностью передающей антенны понимают её способность излучать радиоволны в определенных направлениях более эффективно, чем в других. Представление о направленности дает специальный параметр — амплитудная характеристика направленности, которая определяется как зависимость амплитуды напряженности излучаемого антенной поля (или величины, ей пропорциональной) от направления в пространстве при неизменном расстоянии до точки наблюдения  $M$  [2].

Направление задается меридиональным ( $\theta$ ) и азимутальным ( $\varphi$ ) углами сферической системы координат, как показано на рис. 1.3. Таким образом, амплитудная характеристика направленности описывается модулем некоторой функции  $|f(\theta, \varphi)|$  при  $r = \text{const}$ .

Формула для расчета модуля напряженности электрического поля антенны в произвольном направлении имеет вид

$$|E| = A|f(\theta, \varphi)|,$$

где  $A$  — постоянный множитель, не зависящий от направления на точку наблюдения.

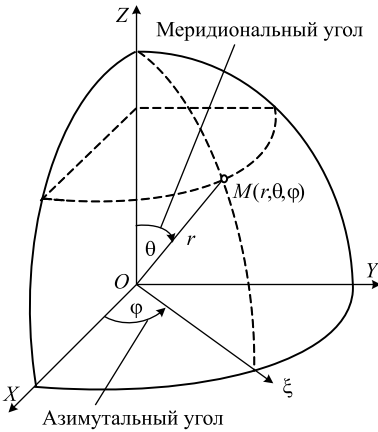


Рис. 1.3. Сферическая система координат

вый центр. Если  $\psi(\theta, \varphi) = \text{const}$  (или меняется скачком на  $180^\circ$  при переходе амплитудной характеристики направленности через нуль), то такая антенна имеет фазовый центр в точке, с которой было совмещено начало координат при расчете фазовой характеристики направленности. Поле излучения антенны в этом случае представляет сферическую волну, исходящую из фазового центра. Фазовыми характеристиками направленности интересуются в радиолокации и радионавигации для определения угловых координат цели и в некоторых других случаях.

В большинстве случаев пользуются амплитудными характеристиками направленности, так как интересуются значением амплитуды напряженности поля (слово «амплитудная» в дальнейшем будем часто опускать).

Графическое изображение характеристики направленности называют диаграммой направленности. По своей сущности функция  $f(\theta, \varphi)$  является аналитическим выражением (формулой) некоторой поверхности. На рис. 1.4 приведены диаграммы направленности двух антенн. Диаграммы относительно просты, поскольку образованы вращением достаточно простых фигур вокруг оси  $Z$ .

В общем случае построение графического изображения функции  $f(\theta, \varphi)$  (объемной диаграммы направленности) неудобно. На практике обычно строят диаграмму направленности в какой-нибудь одной плоскости, в которой она изображается плоской кривой  $f(\theta)$  или  $f(\varphi)$ . Когда речь идет о направленных свойствах антенны, то интересуются характером зависимости напряженности поля от направления на точку наблюдения, а не абсолютным значением на-

В дальнейшем для упрощения записи амплитудной характеристики направленности знак модуля будем опускать.

Наряду с амплитудной характеристикой направленности антенны существует понятие фазовой характеристики направленности —  $\psi(\theta, \varphi)$ , под которой понимается зависимость фазы напряженности поля, создаваемого антенной в точке наблюдения, от направления на эту точку. Знание фазовой характеристики направленности важно прежде всего для решения вопроса, имеет ли данная антенна фазо-



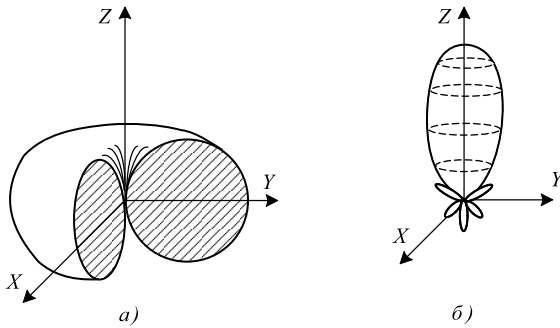


Рис. 1.4. Объемные диаграммы направленности

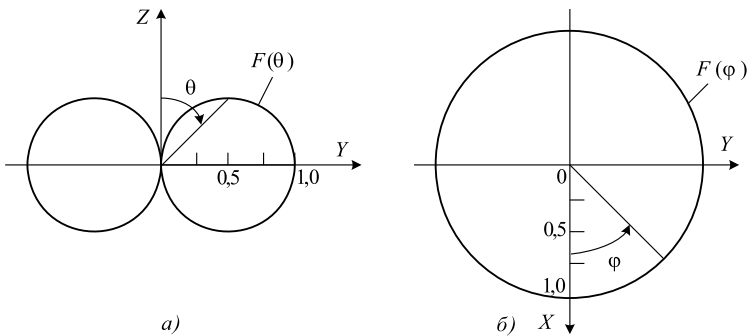


Рис. 1.5. Нормированные диаграммы направленности

пряженности поля. Поэтому обычно используют понятие нормированной характеристики направленности, которую будем обозначать как  $F(\theta)$  или  $F(\varphi)$ . Любая из этих функций легко получается путем нормирования  $f(\theta)$  или  $f(\varphi)$  относительно своих максимальных значений:

$$F(\theta) = f(\theta)/f_{\text{макс}}(\theta);$$

$$F(\varphi) = f(\varphi)/f_{\text{макс}}(\varphi).$$

Для примера на рис. 1.5 приведены нормированные диаграммы направленности, полученные в результате сечения объемной фигуры, показанной на рис. 1.4,а плоскостями  $ZOY$  — рис. 1.5,а и  $XOY$  — рис. 1.5,б.

В сферической системе координат (см. рис. 1.3) диаграмма на рис. 1.5,а соответствует характеристике направленности  $F(\theta)$  при произвольном значении  $\varphi$ , а диаграмма на рис. 1.5,б —  $F(\varphi)$  при  $\theta = 90^\circ$ .

При наличии четко выраженной направленности излучения в диаграмме различают главный, задний и боковые лепестки. Глав-

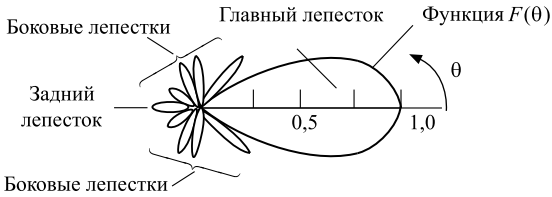


Рис. 1.6. Многолепестковая диаграмма направленности в полярной системе координат

ным лепестком диаграммы направленности является тот, в пределах которого излучение антенны максимально.

Лепесток диаграммы направленности, направление которого образует по отношению к направлению главного лепестка угол, равный или близкий  $180^\circ$ , называется задним. Боковым лепестком диаграммы направленности является любой лепесток кроме главного и заднего. Пример диаграммы направленности с указанием названий лепестков приведен на рис. 1.6.

Задний лепесток и боковые лепестки характеризуются своими уровнями. Под уровнем лепестка понимают отношение его максимума к максимуму главного лепестка. Численно уровень любого лепестка равен значению нормированной характеристики направленности в точке, соответствующей направлению его максимума. В некоторых случаях говорят о кривой, которая огибает все боковые лепестки. Эта кривая так и называется — «огибающая уровней боковых лепестков».

В зависимости от области применения радиосредства могут меняться требования к форме и пространственной ориентации главного лепестка, уровням заднего и боковых лепестков. В рамках настоящего учебного пособия эти вопросы не рассматриваются.

Диаграммы направленности, представленные в полярной системе координат (см. рис. 1.5 и 1.6), очень наглядны, но не всегда удобны для работы с ними, так как масштаб графика можно задавать только вдоль радиуса. Неудобств можно избежать, если диаграммы направленности строить в декартовых (прямоугольных) координатах. В этом случае по оси абсцисс откладывается координатный угол, по оси ординат — нормированное значение характеристики направленности. Масштаб можно выбирать по любой координатной оси, что и предопределяет большее удобство и повышенную точность изображения. Чем уже основной лепесток многолепестковой диаграммы, тем сильнее проявляется преимущество изображения диаграммы направленности в декартовой системе координат. На рис. 1.7,а приведена нормированная диаграмма направленности в

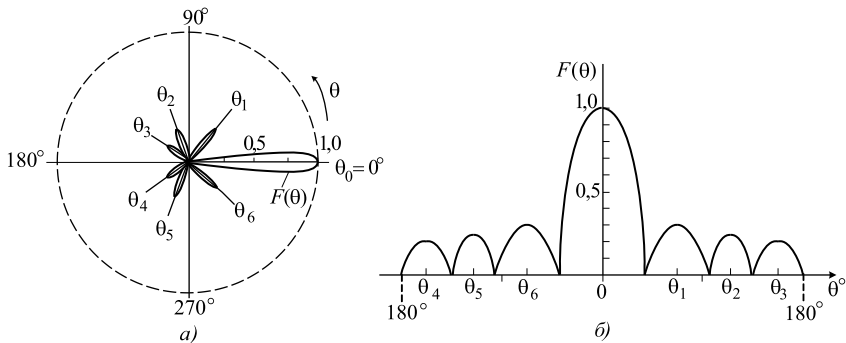


Рис. 1.7. Диаграмма направленности в полярной (а) и декартовой (б) системах координат

полярной системе координат, а на рис. 1.7, б эта же диаграмма представлена в декартовой системе.

Часто при изображении диаграмм направленности в декартовой системе координат используют логарифмический масштаб (в децибелах), вводимый соотношением

$$F(\theta)_{\text{дБ}} = 20 \lg F(\theta).$$

Логарифмический масштаб позволяет существенно повысить точность изображения боковых лепестков с малым уровнем.

На рис. 1.8 приведена одна и та же нормированная диаграмма направленности в декартовой системе координат в относительных единицах (вверху) и децибелах (внизу). Следует обратить внимание на то, что максимальному значению  $F(\theta) = 1$  соответствует  $F(\theta)_{\text{дБ}} = 0$ , а нулевым значениям  $F(\theta) = 0$  соответствуют  $F(\theta)_{\text{дБ}} = -\infty$ .

Все значения нормированной диаграммы направленности в логарифмическом масштабе удовлетворяют условию  $F(\theta)_{\text{дБ}} \leq 0$ .

В некоторых случаях пользуются понятием характеристики направленности в квадрате  $f^2(\theta, \varphi)$ . В учебной и научной литературе по антенной технике её традиционно называют характеристикой направленности по мощности, что физически не совсем корректно. Правильнее называть функцию  $f^2(\theta, \varphi)$  энергетической характеристикой направленности, как это сделано в [3]. Объяснение, почему же функцию  $f^2(\theta, \varphi)$  всё-таки называют характеристикой направленности по мощности, можно найти в [8]. Ограничимся кратким пояснением. Квадрату амплитудной характеристики направленности по полю пропорциональна мощность, излучаемая антенной в элемент телесного угла  $d\Omega$ , ограниченного элементарной площадкой  $dS$  замкнутой сферической поверхности  $S$ , окружающей антенну, т. е.

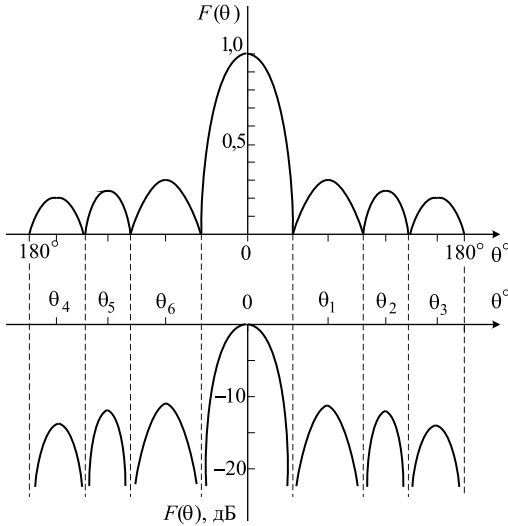


Рис. 1.8. Диаграмма направленности в декартовой системе координат в относительных единицах (вверху) и децибелах (внизу)

$P_{d\Omega}(\theta, \varphi) \sim f^2(\theta, \varphi)$ . Для краткости функцию  $P_{d\Omega}(\theta, \varphi)$  называют мощностью излучения в заданном направлении, определяемом углами  $\theta$  и  $\varphi$  (см. рис. 1.3). С учетом этого функцию  $f^2(\theta, \varphi)$  можно называть характеристикой направленности по мощности.

Характеристику направленности по мощности можно нормировать к максимальному значению и получить таким образом нормированную характеристику направленности по мощности  $F^2(\theta, \varphi)$ .

На практике обычно рассчитывают нормированные характеристики направленности по мощности и строят соответствующие нормированные диаграммы направленности в отдельных плоскостях, в которых они изображаются плоскими кривыми  $F^2(\theta)$  или  $F^2(\varphi)$ .

Нормированная характеристика направленности по мощности, например, представленная в децибелах, имеет вид

$$F^2(\theta)_{\text{дБ}} = 10 \lg F^2(\theta) = 20 \lg F(\theta).$$

Следует обратить внимание на то, что нормированная диаграмма направленности по мощности  $F^2(\theta)$  и нормированная диаграмма направленности по полю  $F(\theta)$ , если их построить в линейном масштабе, не совпадут по форме. Однако эти же диаграммы при переходе к логарифмическому масштабу (к децибелам) будут в точности совпадать, так как  $20 \lg F(\theta) = 10 \lg F^2(\theta)$ .

Угол между двумя направлениями диаграммы направленности передающей антенны, на границах которого напряженность поля

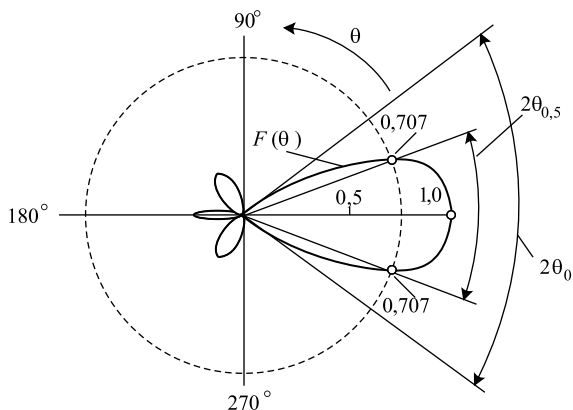


Рис. 1.9. Определение ширины главного лепестка по уровню половинной мощности  $2\theta_{0,5}$  и по уровню нулевого излучения  $2\theta_0$

падает до определенного значения, называется шириной диаграммы направленности. Обычно вводят понятие ширины диаграммы по уровню половинной мощности  $2\theta_{0,5}$  и по уровню нулевого излучения  $2\theta_0$ . Если рассматривать диаграмму направленности по полю, то значение  $2\theta_{0,5}$  соответствует углу между направлениями диаграммы, которые ограничивают главный лепесток по уровню  $F(\theta) = 0,707$ . Если же перейти к диаграмме направленности по мощности, то значение  $2\theta_{0,5}$  будет соответствовать углу между направлениями, где  $F^2(\theta) = (0,707)^2 = 0,5$ . Следует обратить внимание на то, что поскольку среднее (во времени) значение плотности потока энергии прямо пропорционально квадрату амплитуды напряженности электрического поля, то на границах угла  $2\theta_{0,5}$  среднее значение плотности потока энергии будет равно половине своего максимального значения.

Значение  $2\theta_0$  соответствует углу между двумя направлениями диаграммы направленности, на границах которого напряженность поля падает до нулевых значений. Примеры определения ширины главного лепестка по уровню половинной мощности  $2\theta_{0,5}$  и по уровню нулевого излучения  $2\theta_0$  приведены на рис. 1.9 для диаграммы, представленной в полярной системе координат, и на рис. 1.10 для этой же диаграммы, представленной в декартовой системе координат. При этом на рис. 1.10,а диаграмма направленности изображена в обычном относительном масштабе, а на рис. 1.10,б — в логарифмическом (используется децибельная мера).

Следует обратить внимание на то, что при определении ширины главного лепестка по уровню половинной мощности  $2\theta_{0,5}$  по диаграмме рис. 1.10,б вдоль ограничивающих направлений уровень