

А.А. ТИМОФЕЕВА

АНТЕННЫ, МИР И МЫ



Москва
2012

T41 Тимофеева А.А. Антенны, мир и мы — М.: ИРИАС, 2012. — 376 с.

ISBN 978-5-93592-053-1

Уважаемые читатели! Вы держите в руках необычную книгу, где говорится не только об антеннах, но и о многом другом, что, на первый взгляд, с ними совершенно несовместимо. Но их соединение в одной книге является закономерным следствием перехода к новому этапу познания мира и себя, на котором, как показывают последние научные открытия, без совмещения, казалось бы, несовместимого обойтись уже невозможно.

Эта книга состоит из трех частей:

Часть 1 — «Антенны рупорные и зеркальные» — посвящена, в основном, оптимизации рупоров и их использованию в качестве облучателей зеркальных антенн РРЛ и земных станций спутниковых систем. Она имеет ярко выраженный практический уклон и предназначена для студентов радиотехнических специальностей и специалистов по антенной технике.

Часть 2 — «Антенны, антеннами не называемые» — посвящена совершенно новой тематике — искусственным сооружениям и естественным природным образованиям, антеннами пока не называемым, которыми фактически является все, существующее в нашем мире, включая нас самих. Эта часть базируется, в основном, на предположениях и гипотезах, граничащих иногда с фантастикой. Поэтому она предназначена для тех, кто ищет новые и нетрадиционные направления в области антенной науки.

Часть 3 — «Новый этап познания мира и себя» — посвящена новому подходу к познанию мира и себя в этом мире, а также поиску Всеобщих Законов Природы, которые распространяются на все сферы нашей жизни, включая любую науку, любое человеческое сообщество и каждого отдельного человека. Эта часть, как и вторая, базируется на гипотезах и предположениях, как разумных, так и «безумных», а предназначена она не только для специалистов по антенной технике, а для всех, кто ищет новые пути развития науки, общества и самого себя.

Тимофеева Алина Анатольевна

ЛР № 070785 от 15.12.97 г.

Подписано в печать 6.06.2012 г.

Формат 60х90/16. Печать офсетная. Усл. печ. л. 14,2.

Тираж 500 экз. Изд. 15.

Подготовлено к печати ЗАО ИРИАС.

101000, Москва, Кривоколенный пер., д. 14, стр. 1

Тел.: +7 (495) 625-4257, факс: +7 (495) 621-2797

Отпечатано в полном соответствии с качеством предоставленного электронного оригинал-макета в типографии филиала ОАО «ТАТМЕДИА» «ПИК «Идел-Пресс».

420066, г. Казань, ул. Декабристов, 2.

E-mail: idelpress@mail.ru

ISBN 978-5-93592-053-1

© Тимофеева А.А.

ЧАСТЬ I

РУПОРНЫЕ И ЗЕРКАЛЬНЫЕ АНТЕННЫ

Введение

Антенны, используемые для связи впервые Поповым и Маркони, недавно (вместе с Радио) отметили свой столетний юбилей, а их расцвет приходится на вторую половину прошлого (20-го) века.

Основные тенденции развития антенн в течение их прошлой вековой жизни постепенно менялись. С последовательным освоением все более и более высоких диапазонов частот, которое сейчас уже коснулось волн миллиметрового диапазона, менялись и типы антенн. С расширением сети и внедрением все новых и новых систем связи увеличивались требования, предъявляемые к их электрическим параметрам, особенно к помехозащищенности. Однако сейчас все более актуальными становятся требования по уменьшению стоимости антенн, так как антенны из уникальных сооружений уже перешли в разряд изделий почти «повседневного спроса». Но уменьшение стоимости непосредственно связано с упрощением конструкции и уменьшением материалоемкости, а это почти всегда входит в противоречие с улучшением электрических параметров. И предпочтение все чаще отдается более дешевым, хотя и менее «совершенным», антеннам.

Тенденция улучшения параметров антенн не обошла стороной и рассмотренные в данной части рупорные и зеркальные антенны. Простейшие рупорные антенны, чтобы улучшить свои электрические параметры, усложнились и разветвились на несколько направлений, основными из которых являются конические и пирамидальные рупоры с канавками, диэлектриком, поглотителем, изломом образующей. Зеркальные антенны также разделились на несколько направлений, а основными из них являются: однозеркальные и двухзеркальные осесимметричные антенны, рупорно-параболические (пирамидальные и конические) и антенны с вынесенным облучателем.

Рупорные антенны очень часто рассматриваются и используются в единой «связке» с зеркальными, так как облучателями большинства зеркальных антенн являются рупоры разных модификаций. Именно в таком аспекте рассмотрены они и в этой части, в основу которой положены результаты научно-исследовательских и внедренческих работ, проводимых в течение нескольких десятилетий группой сотрудников Научно-исследовательского института радио (НИИР) под руководством и/или при непосредственном участии автора данной книги.

Наиболее интересная информация вошла в монографии [1] — [3], отдельные разделы которых написаны автором данной книги. Патенты, авторские свидетельства и научные статьи ([4] — [52] и др.) по отдельным этапам работ посвящены, в основном, проблеме оптимизации рупорных и зеркальных антенн. Многое из этих материалов использовано О.П. Фроловым в его книгах по антеннам, включая последнюю: О.П. Фролов, В.П. Вальд «Антенны для земных станций спутниковой связи», изданных уже в этом веке, но без привлечения к работе над этими книгами самих разработчиков.

В то же время каждая отдельная публикация, освещающая лишь часть этой важной проблемы, не дает возможности охватить ее в целом. А так как оптимизация параметров антенн является актуальной и поныне, то в данной работе представлена наиболее полная информация по улучшению основных параметров зеркальных антенн разных типов за счет оптимизации их облучателей, причем с привлечением некоторых не опубликованных ранее материалов.

В этой книге устранены, по возможности, неточности, опечатки и описки, допущенные в более ранних публикациях. Однако не исключено, что некоторые из них остались незамеченными, а также могли появиться и новые, включая «компьютерные», возникающие при переходе на другие версии базовых программ. Поэтому будьте внимательны.

Эта часть посвящена конкретным вопросам, поэтому в ней, в отличие от большинства других книг по антенной тематике, отсутствуют разделы по общей теории антенн, а изложено, в основном, только то, что может быть использовано при дальнейшем развитии антенной техники и освоении еще более высокочастотных диапазонов.

Так как самыми любимыми моими «детищами» всегда были рупоры с изломом образующей и антенны с вынесенным облучателем, то основное внимание в первой части книги уделено именно этим моим «любимцам», которым даже сейчас, когда появилось множество самых разных рупорных облучателей и типов зеркальных антенн, я предрекаю долгую и плодотворную жизнь.

В последние годы мои интересы значительно расширились, а приоритеты кардинально изменились, что отражено во второй и третьей части этой книги. Но и в этих, новых, исследованиях мне помогают знания в области антенной техники.

Предисловие

Антенны в течение своей, более вековой, жизни прошли свой путь становления, от простого к сложному и более совершенному. Вместе с ними прошел тот же, но очень нелегкий, путь становления и коллектив, с которым мне выпало счастье работать.

Что касается научной тематики, которой пришлось заниматься лично мне, то, начиная свою научную деятельность с коротковолновых антенн, я затем перешла к антеннам СВЧ, включая осесимметричные зеркальные антенны (для радиорелейных и спутниковых систем), РПА и антенны с вынесенным облучателем. Параллельно с этим я занималась разработкой и оптимизацией рупорных облучателей разных видов и модификаций, предназначенных для этих антенн. Довелось мне уделить немного внимания и бортовым антеннам, и спиральным, и антеннам для систем сотовой связи.

В части экспериментальных исследований, начиная (в 60-е годы) измерение ДН по точкам, вращая вручную поворотное устройство, пришлось (параллельно с научной деятельностью) заниматься разработкой измерительных стендов, чтобы автоматизировать измерение ДН, а также усовершенствованием измерительных трасс, подняв, в частности, исследуемые антенны на высокую опору, чтобы исключить влияние полей, отраженных от соседствующих объектов.

В части разработки действующих моделей и макетов пришлось непосредственно заниматься не только конструированием всего, что разрабатывалось, но и многое изготавливать непосредственно своими руками, включая (после освоения стеклопластиковой технологии) и изготовление зеркал для действующих макетов с размером раскрытия до 1,5 — 2 м.

В части внедрения антенн в серийное производство, приходилось брать на себя не только сопровождение разработки КД, включая оснастку, и сопровождение изготовления опытных образцов, но и их электрические испытания.

И только сейчас, оглядываясь назад с высоты пройденных лет, понимаешь, какая колоссальная и многоплановая работа стоит за всем тем, что коротко изложено в этой части, учитывая, что все перечисленное выше, было сделано совсем небольшим коллективом (единовременно насчитывающим всего лишь 4 — 7 человек), причем, преимущественно, женским. Но этой небольшой группе «слабых» женщин удавалось иногда «свернуть горы», как в части объема экспериментальных исследований, так и в части изготовления собственными руками действующих моделей и макетов будущих серийных антенн (облучателей — из фольги, зеркал — из стеклопластика).

И мне очень горько было наблюдать, как в период перестройки было порушено все то, что с таким большим трудом и любовью, создавалось в течение нескольких десятков лет. Первым разрушили исследовательский полигон, земли которого отдали (?) или продали (?) под коттеджное строительство, положив начало ликвидации нашего отдела, одного из ведущих в антенной отрасли. Этот отдел во времена своего расцвета насчитывал более 250 человек, среди которых было несколько докторов и более десятка кандидатов наук, а к настоящему времени от него осталось всего несколько человек. Переименовался и перепрофилировался (с производства антенн на выпуск газового оборудования), оказавшись в ближнем «зарубежье», и бывший завод «Промсвязь» (г. Ахтырка Сумской области), а антен-

ны, сделанные по иностранным разработкам, стали покупать в дальнем зарубежье. Такова реальность сегодняшнего дня, но вернемся к прошлому. Состав нашего маленького коллектива не был постоянным, хотя в нем были и «долгожители», но на смену ушедшим приходили другие, и работа продолжалась.

Дорогие мои коллеги! Я от всей души благодарна всем Вам, вне зависимости от величины Вашего вклада в наше общее дело. Многие из вас внесли в эту работу не только часть своего труда, но и часть своей души. Таких людей очень много, поэтому здесь я назову имена лишь тех, кто проработал в общей связке достаточно долго и/или оставил о себе очень хорошие воспоминания.

В первую очередь, мой глубокий поклон **Зое Константиновне Хлопковой**. Она в течение последних (почти 20-ти) лет несла на себе основной груз экспериментальных исследований, а после смерти Фомичева Ивана Александровича взяла в свои руки и изготовление макетов зеркал из стеклопластика, которое он блестяще освоил и занимался им до самой своей смерти.

Я постоянно вспоминаю и **Ирину Анатольевну Козловскую**, мою постоянную спутницу в поездках на заводы-изготовители, которая также проработала со мной почти 20 лет и поддерживала меня во всех моих начинаниях.

Мне хочется сказать: «Большое спасибо!» и **Казаковой Т. А.**, и **Спивак Н. Н.**, и **Дроновой В. А.**, и **Жулидовой Ирочке**, которая, к сожалению, проработала с нами совсем мало, но успела, однако, сделать многое и, главное, оставила мне на память свою чудесную светлую улыбку, сопровождающую меня всю жизнь.

Отдельно и особую благодарность я хочу выразить доктору наук, профессору, **Айзенбергу Григорию Захаровичу**. Именно он помог многим из нас, включая меня, поверить в собственные силы, помог понять, что в науке, как и везде, «не БОГИ горшки обжигают», а самые обыкновенные, но очень увлеченные своим делом, люди. Именно таким был и он сам, этот исключительно порядочный, удивительно добрый и чуткий **ЧЕЛОВЕК**.

Я также бесконечно благодарна моему мужу, **Тимофееву Валерию Викторовичу**, который является не только автором и соавтором нескольких научных работ, используемых в данной части книги, но и автором раздела 3.1 данной книги: **«Международные требования к характеристикам направленности зеркальных антенн»**. Кроме того, он, зачастую, выступал и добровольным редактором моих научных трудов, включая данную книгу, а также самым строгим их оппонентом.

Я также хочу высказать благодарность **Ерухимовичу Юрию Абрамовичу**, с которым нас объединяла страстная увлеченность работой. И, несмотря на некоторые научные (и другие) разногласия, мы продолжали с ним сотрудничество по отдельным вопросам даже после того, как наши пути принципиально разошлись по разным научным направлениям.

Моя благодарность относится и к тем, включая **Глазмана Я.Д.**, кто шел, своим «курсом», но параллельно принимал участие и в решении некоторых, общих для нас, проблем.

Дорогие мои соавторы, я надеюсь, что работа, проделанная всеми нами совместно, еще будет востребована, а поэтому и взяла на себя смелость и труд опубликовать ее результаты.

Я от всей души желаю всем ВАМ, ныне здравствующим, еще многих и счастливых лет жизни, а ТЕМ, кто уже ушел от нас: Григорию Захаровичу Айзенбергу, Всеволоду Григорьевичу Ямпольскому, Юрию Абрамовичу Ерухимовичу и другим, долгой и светлой памяти.

Глава 1

Рупорные антенны

1.1. Основные виды и характеристики рупорных антенн

1.1.1. Основные виды рупорных антенн

Рупорная антенна, в общем случае, представляет собой волновод с плавно (или скачкообразно) увеличивающимся сечением. Размеры сечения волновода (и рупора) выбираются таким образом, чтобы обеспечить формирование необходимой структуры поля. В круглом волноводе возбуждается обычно волна H_{11} , а в прямоугольном — H_{10} . Эти волны принято называть основными. Два основных типа рупоров: конические и пирамидальные отличаются, как и волноводы, типом возбуждаемых в них волн.

По конструкции рупорные антенны можно подразделить следующим образом:

- Рупоры (Р) простейшие с прямолинейной образующей.
- Рупоры с изломом (РИ), образующая которых имеет излом или изгиб.
- Рупоры с канавками (РК).
- Рупоры с диэлектриком (РД).
- Рупоры с поглотителем (РП).
- Рупорные биконические антенны (РБА).
- Сложные рупорные антенны, совмещающие несколько решений.

Наиболее простыми (конструктивно) являются конические и пирамидальные рупоры (Р) с гладкими стенками, имеющие соответственно круглое и прямоугольное сечение и прямолинейную образующую. Рупоры с резким изломом (или плавным изгибом) образующей обозначены как РИ. Рупоры с канавками (РК) и рупоры с диэлектриком (РД) являются рупорами с импедансной структурой. Канавки и диэлектрик, как, впрочем, и поглотитель в рупорах с поглотителем (РП), могут быть расположены на внутренней и/или на внешней стороне стенок рупоров, либо на фланце или насадке. Цель таких усложнений конструкции рупорных антенн — изменение их основных характеристик в соответствии с заданными требованиями.

1.1.2. Основные характеристики рупорных антенн

Основными электрическими характеристиками рупорных, как и любых других антенн, являются:

- Рабочий диапазон.
- Направленные свойства.
- Согласование с питающим трактом

Рабочий диапазон определяется заданной полосой частот (длин волн), в пределах которой основные параметры антенны остаются практически неизменными и/или удовлетворяют определенным требованиям.

Рабочий диапазон зависит от размеров и конструкции рупора. При усложнении конструкции рабочий диапазон, как правило, сужается.

Направленные свойства зеркальных и рупорных антенн определяются размером раскрытия, а также амплитудным и фазовым распределением поля в его пределах, которое можно формировать разными способами.

Направленные свойства антенн обычно характеризуются:

- Диаграммой направленности (ДН) или ее огибающей.
- Коэффициентом усиления (КУ).
- Шириной главного лепестка по уровню половинной мощности ($2\Theta_{0,5}$)

и/или по нулям ($2\Theta_0$).

- Уровнем первого бокового лепестка (ПБЛ).
- Защитным действием (ЗД) — разностью между усилением антенны в главном направлении и вблизи направления заднего излучения ($180^\circ \pm \Delta$, обычно $\Delta = 45^\circ$).

Согласование антенн с питающим трактом (волноводом) определяется величиной полей, отраженных назад (в волновод) от имеющихся на пути сигнала неоднородностей. Оно может быть улучшено уменьшением, а также благодаря противофазному сложению полей, отраженных от разных неоднородностей.

Согласование принято характеризовать коэффициентом отражения (КО) или коэффициентом стоячей волны (КСВ).

1.1.3. Область применения

Рупорные антенны, в принципе, могут использоваться самостоятельно, но чаще всего их применяют в качестве облучателей антенн разных типов (зеркальных, линзовых, антенн поверхностных волн и др.).

Использование рупоров в качестве остронаправленных антенн нецелесообразно, так как даже при ширине главного лепестка порядка нескольких градусов, не говоря о минутах, они, в отличие от зеркальных антенн, имеют весьма большие продольные размеры. Но зато они получили очень широкое распространение в качестве облучателей, где требуемая ширина главного лепестка составляет обычно нескольких десятков градусов, а при такой ширине размеры рупоров сравнительно небольшие.

Для обеспечения возможности использования одних и тех же зеркальных антенн в разных системах связи целесообразно, чтобы их основные параметры соответствовали требованиям не одной конкретной системы, а сразу нескольким, т.е. желательно, чтобы антенны были широкодиапазонными и универсальными, а это во многом зависит от облучателя.

1.2. Требования к облучателям зеркальных антенн

1.2.1. Общие и частные требования к облучателям

Требования, предъявляемые к облучателям зеркальных антенн, можно подразделить на общие и частные.

Общие требования к облучателям совпадают с общими требованиями, предъявляемыми к большинству многофункциональных антенн:

- Максимально широкий рабочий диапазон.
- Максимально возможная помехозащищенность.
- Хорошее согласование с питающим трактом.
- Возможность работы на любой поляризации.

Возможность выполнения этих требований, исключая эффективность, зависит не только от схемы антенны и относительных (в длинах волн) размеров используемых зеркал, но и от аналогичных параметров облучателей. Что касается эффективности, то ее можно обеспечить только путем создания в раскры-

ве антенны распределения амплитуды поля, близкого к равномерному, либо путем модификации профиля зеркала, либо путем использования облучателя со специальной (оптимальной) формой главного лепестка. Так как одновременное повышение эффективности и помехозащищенности только за счет облучателя являются противоречивыми требованиями, то иногда одновременно применяется и облучатель с оптимальной ДН, и модификация профиля зеркала. Но чаще всего (в зависимости от конкретных требований) до заданной величины улучшают либо эффективность антенны при максимально возможной помехозащищенности, либо помехозащищенность при максимально возможной эффективности.

Частные требования, предъявляемые к облучателю, зависят от основной конечной цели оптимизации и назначения каждой конкретной антенны, если она не является многофункциональной, а поэтому они могут быть разными:

- Оптимальный облучатель, предназначенный для антенн, работающих на двух поляризациях должен (в пределах рабочего сектора углов) иметь одинаковую на обеих поляризациях форму главного лепестка.
- Оптимальный облучатель, предназначенный для антенн с высокой эффективностью, должен обеспечивать в раскрытии антенны распределение амплитуды и фазы поля, близкое к равномерному.
- Оптимальный облучатель, предназначенный для антенн с высокой помехозащищенностью, должен предусматривать возможность создания в раскрытии антенны амплитудного распределения, спадающего по определенному закону и сам обладать повышенной помехозащищенностью.
- Облучатель, предназначенный для антенн с разным в разных плоскостях размером апертуры, должен формировать разную по плоскостям ширину главного лепестка.

1.2.2. Оптимальная форма главного лепестка

Оптимальная форма главного лепестка облучателя в пределах рабочего сектора, ограниченного углом облучения зеркала, определяется схемой антенны и геометрией зеркала (осесимметричная или неосесимметричная, однозеркальная или двухзеркальная, выполненная по классической схеме или с модификацией профиля зеркала, и др.). Особенно трудно создать оптимальную форму главного лепестка облучателя, предназначенного для использования в схеме неосесимметричной однозеркальной антенны с вынесенным облучателем (АВО), к которым, в частности, относится и рупорно-параболическая антенна (РПА).

Для осесимметричных зеркальных антенн оптимальной формой является осесимметричная в пределах угла облучения зеркала ($-\varphi_0$ $+\varphi_0$) форма главного лепестка, показанная на рис. 1.1 сплошной линией: воронкообразная (а) или куполообразная (б) в зависимости от требований, предъявляемых к антенне, от ее схемы и геометрии зеркала. Равномерное распределение (см. рис. 1.1, пунктир) можно получить (благодаря соответствующей схеме антенны) при любой из этих форм.

Если центральная часть зеркала затенена облучателем, как это имеет место у осесимметричных антенн, то оптимальная ДН облучателя (при использовании классических схем) должна в центре иметь «провал», соответствующий затеняемой части. Исключение составляют антенны с зеркалами специального профиля и антенны, выполненные по схеме АДЭ (антенны двухзер-

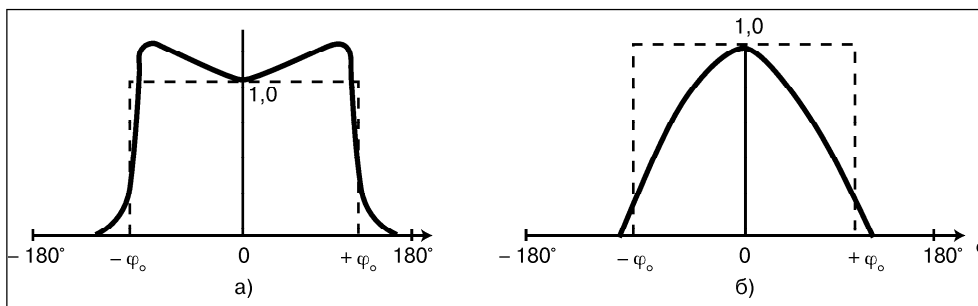


Рис. 1.1

кальные со смещенной фокальной осью и эллиптическим вспомогательным зеркалом), где в распределении энергии, включая создание «провала» (см. рис. 1.1), участвуют зеркала.

Для неосесимметричных зеркальных антенн (АВО и РПА) главный лепесток ДН в поперечной плоскости должен быть таким же, как и для осесимметричной антенны (см. рис. 1.1). А в продольной плоскости (плоскости симметрии антенны) — асимметричным, аналогичным одной из половинок ДН, приведенной на рис. 1.1а (если принять, что центральная часть освещает ближнюю кромку зеркала, а крайняя — дальнюю). Такая ДН позволяет создать симметричное распределение амплитуды поля в продольной плоскости и АВО, и РПА.

Необходимая величина подъема (или спада) поля облучателя в направлении краев зеркала (основного и/или вспомогательного) определяется углом раствора основного зеркала и требованиями по помехозащищенности и эффективности. С уменьшением фокусного расстояния и увеличением глубины зеркала величина подъема (при прочих равных условиях) увеличивается.

Реализовать указанные выше параметры в их полном объеме за счет оптимизации только первичного облучателя в большинстве случаев не представляется возможным. Поэтому в сочетании с его оптимизацией зачастую используют и другие средства (оптимизацию профиля зеркал, различные экраны и др.).

Модификация профиля зеркал, особенно основного, усложняет разработку антенн, увеличивая, зачастую, их стоимость. Кроме того, такой способ оптимизации может быть использован только при разработке новых антенн. Поэтому более предпочтительным вариантом является оптимизация параметров антенны за счет оптимизации параметров ее облучателя, что дает возможность улучшать характеристики не только вновь разрабатываемых антенн, но и уже эксплуатируемых (путем их небольшой модернизации).

На сегодня разработано большое число различных облучателей зеркальных антенн, включая рупорные, ДН которых в той или иной степени отвечают требованиям оптимальности. Варианты рупоров, рассмотренные в этой главе, позволяют значительно улучшить почти все электрические параметры зеркальных антенн (осесимметричных и неосесимметричных) одновременно. Не исключено использование этих рупоров и в качестве самостоятельных антенн, если форма их ДН отвечает каким-либо заданным специфическим требованиям. Но начнем наш анализ все же с простейших рупоров (конических и пирамидальных с гладкими стенками и прямолинейной образующей), являющихся базой для разработки всех других рупорных антенн, рассмотренных далее.

1.3. Простейшие рупорные антенны

1.3.1. Распределение фаз в раскрыве

Рупорные антенны (конические и пирамидальные), рис. 1.2, часто относят к классу апертурных антенн, в которых определяющую роль играет размер апертуры (раскрыва). Однако это справедливо только для рупоров, имеющих в раскрыве синфазное распределение, которое практически никогда не реализуется.

Распределение фаз в раскрыве (коротко: расфазировка) реальных конических и пирамидальных рупоров имеет форму, близкую к сферической поверхности, а секториальных — цилиндрической.

Точная формула для расчета максимальной расфазировки в раскрыве простейшего рупора — $\Delta\varphi$ (ее выражают или в длинах волн, или в градусах, или в радианах (π)) имеет следующий вид:

$$\Delta\varphi = \beta (L-H) = \beta R \operatorname{tg}(\alpha/2), \quad (1.1)$$

где $\beta = 2\pi/\lambda$ — волновое число, λ — длина волны; L и H — соответственно длина образующей и высота рупора до его геометрической вершины; $2R$ — размер апертуры рупора в плоскости расчета; 2α — угол раствора рупора в плоскости расчета.

Приближенная формула для расчета $\Delta\varphi$, используемая во многих работах, включая [1], справедлива для рупоров, где $R \ll H$:

$$\Delta\varphi \approx \beta R^2/2H. \quad (1.2)$$

1.3.2. Положение фазового центра

Знание положения фазового центра крайне важно при использовании рупоров в качестве облучателей, так как только при совмещении фазового центра облучателя с фокусом зеркала можно обеспечить максимальную эффективность антенны.

Известно, что фазовый центр синфазных рупоров находится вблизи раскрыва, а с увеличением расфазировки он смещается в сторону геометрической вершины рупора (к сечению волновода).

К синфазным рупорам, где основную роль играет размер апертуры ($2R$), можно (условно) отнести такие рупоры, у которых незначительная расфазировка не оказывает существенного влияния на основные параметры направленности, а фазовый центр расположен вблизи раскрыва.

К расфазированным рупорам, где определяющую роль играет не размер апертуры, а угол раствора (2α), можно (условно) отнести такие рупоры, фазовый центр которых смещается к их горлу, а дальнейшее увеличение расфазировки не оказывает существенного влияния на их параметры направленности.

Между значениями расфазировки, характерными для синфазных и расфазированных рупоров, существует промежуточная зона, в которой свойства

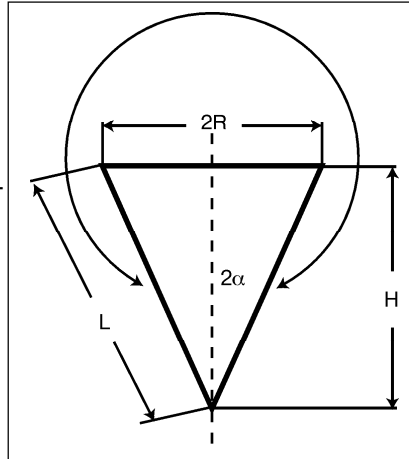


Рис. 1.2

рупоров отличаются и от свойств синфазных, и от свойств расфазированных. Рупоры, имеющие такую расфазировку, условимся называть полурасфазированными рупорами.

Подразделение рупоров на синфазные, полурасфазированные и расфазированные весьма условно, так как четкой границы между ними нет. Однако они принципиально отличаются по своим направленным свойствам и положению фазового центра.

Положение фазового центра любого рупора можно найти экспериментально, а для простейших конических рупоров с круглым раскрывом и пирамидальных с квадратным раскрывом, имеющих в пл. Е равномерное, а в пл. Н косинусоидальное распределение амплитуды поля, определить по формулам и/или графикам, приведенным в [1].

На рис. 1.3 [1] дана зависимость отношения x/h от расфазировки k , где x — расстояние от раскрыва до фазового центра, h — высота рупора. Расфазировка (k) в этом случае выражена в градусах и рассчитана по приближенной формуле (1.2).

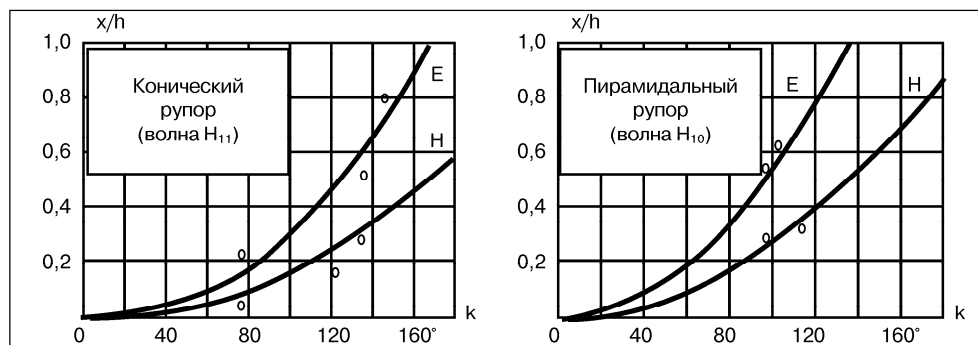


Рис. 1.3

Смещение фазового центра обоих типов рупоров (конического и пирамидального) в пл. Е примерно в два раза больше, чем в пл. Н. При этом перемещение фазового центра конического рупора (при изменении расфазировки) происходит медленнее, чем пирамидального. Все это не позволяет (при использовании их в качестве облучателей) обеспечить синфазное возбуждение зеркала одновременно на обеих поляризациях.

Перемещение фазового центра конического рупора с осесимметричной ДН, имеющего одинаковое (спадающее) распределение амплитуды поля в обеих плоскостях, происходит на обеих поляризациях примерно одинаково [1] и соответствует значениям смещения фазового центра для плоскости Н обычного рупора. Можно предположить, что то же самое справедливо и для пирамидальных рупоров, имеющих одинаковое (спадающее) распределение амплитуды поля на обеих поляризациях.

Кстати, пирамидальные рупоры с размером апертуры в пл. Н в $\sim 1,5$ раза больше, чем в пл. Е (их принято называть оптимальными), имеют в обеих плоскостях не только одинаковую ширину главного лепестка, но и примерно совпадающее на обеих поляризациях положение фазового центра. Но использовать это свойство можно только при работе антенны со строгой привязкой вектора Е и Н к соответствующим плоскостям рупора (и антенны, если рупор используется в качестве облучателя).

Скорость перемещения фазового центра в сильной степени зависит от величины расфазировки, и при $\Delta\varphi \approx k \geq 4\pi/3$ он смещается в горло рупора. Поэтому область «риска», соответствующая максимальной скорости перемещения фазового центра, расположена между раскрывом и горлом, что подтверждается и приведенными графиками.

При $\Delta\varphi \approx k \leq 45^\circ$ смещение фазового центра из раскрыва обоих типов рупоров (особенно, конического) происходит весьма медленно. Незначительно оно и по величине. Поэтому рупоры с расфазировкой $\Delta\varphi \leq \pi/4$ можно условно отнести к синфазным рупорам.

При $\Delta\varphi \approx k \geq 160^\circ$ в пл. Е и (предположительно) при $\Delta\varphi \approx k \geq 240^\circ$ в пл. Н — для конического, а также при $\Delta\varphi \approx k \geq 130^\circ$ в пл. Е и (предположительно) при $\Delta\varphi \approx k \geq 210^\circ$ в пл. Н — для пирамидального рупора, фазовый центр перемещается в горло. Поэтому конические рупоры с $\Delta\varphi \geq 4\pi/3$ и пирамидальные рупоры с $\Delta\varphi \geq 7\pi/6$ можно считать расфазированными рупорами.

В зависимости от величины расфазировки рупоры (в грубом приближении и без подразделения их на конические и пирамидальные) можно условно разделить на следующие три группы:

- $\Delta\varphi \leq \pi/4$ ($\leq 45^\circ$) — синфазные;
- $\pi/4 \leq \Delta\varphi \leq 4\pi/3$ — полурасфазированные;
- $\Delta\varphi \geq 4\pi/3$ ($\geq 240^\circ$) — расфазированные.

Фазовый центр синфазных рупоров «точечный» и сравнительно стабилен лишь при $\Delta\varphi \leq \pi/4$. Поэтому требования к точности его совмещения с фокусом зеркала весьма велики, а рабочий диапазон синфазных рупоров, исходя из требований к стабильности фазового центра, сравнительно узок.

Фазовый центр расфазированных рупоров представляет собой весьма обширную область, которая при $\Delta\varphi \geq 4\pi/3$ практически никуда не смещается, но в пределах данной области фаза (при увеличении расфазировки) все больше осциллирует. Однако выбросы обычно не превышают $\pi/4$ (45°) и находятся в пределах допусков на точность изготовления конструктивных элементов, влияющих на электрические параметры антенн.

Поэтому требования к точности совмещения фазового центра с фокусом зеркала уменьшаются, а рабочий диапазон рупора (с точки зрения стабильности фазового центра) со стороны его коротковолновой части практически не ограничен.

Фазовый центр полурасфазированных рупоров очень нестабилен и с изменением расфазировки (длины волны) перемещается очень быстро. Поэтому рабочий диапазон таких рупоров весьма узок.

1.3.3. Направленные свойства

Синфазные рупоры ($\Delta\varphi \leq \pi/4$) имеют: существенно разные по ширине ДН в пл. Е и Н (их главный лепесток в пл. Е значительно уже, чем в пл. Н); четко выраженные и глубокие минимумы между лепестками; более высокий уровень бокового излучения в пл. Е по сравнению с пл. Н. Их четко выраженный («точечный») фазовый центр расположен, как уже было сказано, вблизи раскрыва. При малых расфазировках, условно допустимых для этих рупоров, он практически совпадает по плоскостям.

На рис. 1.4 [1] показана зависимость $D/D_{\text{макс}}$ — коэффициента направленного действия (КНД) от расфазировки (при квадратичном законе изменения фазы в апертуре, что применимо и к рупорам).

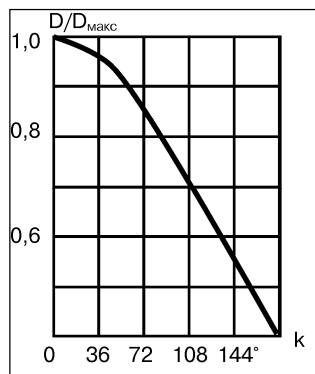


Рис. 1.4

При $\Delta\varphi \approx k = \pi/4$ (45°) КНД уменьшается всего до $0,93 \div 0,94$, но при больших значениях k потери усиления значительны.

Сводка формул, характеризующих излучение синфазных поверхностей, которые применимы и к синфазным рупорам, приведена во многих монографиях, включая [1], где, в частности, даны формулы для расчета ширины главного лепестка ДН по нулям ($2\theta_0$).

Для конического рупора

$2\theta_0 = 2 \arcsin(1,22\lambda/d)$ — при равномерном распределении, (1.3)

$2\theta_0 = 2 \arcsin(1,63\lambda/d)$ — при косинусоидальном распределении, (1.4)

где λ — длина волны, d — диаметр раскрытия.

Расчетный уровень первых боковых лепестков синфазного конического рупора составляет $-17,6$ дБ и $-24,6$ дБ при равномерном и косинусоидальном распределении, соответственно.

Для пирамидального рупора

$2\theta_0 = 2\lambda/2a$ — при равномерном распределении, (1.5)

$2\theta_0 = 1,43 \cdot 2\lambda/2a$ — при косинусоидальном распределении, (1.6)

где $2a$ — размер апертуры в плоскости расчета.

Расчетный уровень первых боковых лепестков синфазного пирамидального рупора составляет $-13,2$ дБ и $-20,6$ дБ при равномерном и косинусоидальном распределении, соответственно.

Полурасфазированные рупоры ($\pi/4 \leq \Delta\varphi \leq 4\pi/3$) отличаются наибольшей зависимостью параметров от частоты, так как с увеличением расфазировки не только перемещается фазовый центр рупора, но изменяются и его направленные свойства. Быстро и существенно уменьшается КНД (см. рис. 1.4), меняется и ДН: заплывают провалы между лепестками, а главный лепесток расширяется, «захватывая» ближние боковые лепестки. Наиболее существенные изменения происходят в пл. Е.

При $\Delta\varphi = \pi$ главный лепесток ДН становится практически осесимметричным: одинаковым (по уровню $-15 \div -20$ дБ) на обеих поляризациях и по ширине, и по форме (куполообразной).

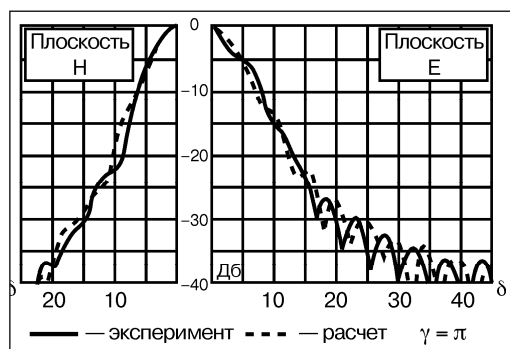


Рис. 1.5

На рис. 1.5. показаны ДН конического рупора [2] с расфазировкой $\Delta\varphi = \gamma = \pi$ в функции обобщенного параметра δ ($\delta = \beta r \sin\varphi$, где $\beta = 2\pi/\lambda$, λ — длина волны, r — радиус раскрытия рупора).

В пределах главного лепестка ДН на обеих поляризациях (Е и Н) почти идентичны, но КНД при этом уменьшается до 0,4 (см. рис. 1.4). Поэтому применение таких рупоров в качестве самостоятельных остро-направленных антенн, как правило, нецелесообразно.

Рупор с расфазировкой $\Delta\varphi = \pi$ можно, однако, использовать в качестве простейшего облучателя, имеющего сравнительно осесимметричный главный лепесток, но в весьма узкой полосе частот.

Дальнейшее увеличение расфазировки ($\Delta\varphi > \pi$) приводит к тому, что главный лепесток в пл. Е становится шире, чем в пл. Н (как бы меняясь местами по сравнению с синфазным рупором), изменяется и форма его вершины, еще

более уменьшается КНД, а фазовый центр приближается к горлу рупора.

Расфазированные рупоры ($\Delta\varphi \geq 4\pi/3$) отличаются наибольшей стабильностью всех основных параметров, так как при большой расфазировке параметры рупора определяются, в основном, углом раствора рупора, который с длиной волны не связан.

Изменение КНД (в направлении оси) [1] расфазированного конического рупора, возбуждаемого волной H_{11} , (по отношению к КНД синфазно возбужденной апертуры) в функции обобщенного параметра δ показано на рис. 1.6. Там же приведены значения расфазировки (γ) на краю раскрытия, кратной целым значениям π , которая рассчитана по (1.2)

Зависимость КНД от γ имеет ярко выраженную тенденцию к понижению и осциллирующий характер. Первое связано с расширением главного лепестка, а второе — с изменением формы его вершины в главном направлении. При расфазировке, кратной четным целым значениям π КНД имеет частные минимумы, а при нечетных — максимумы. Не совсем точное совпадение минимумов и максимумов соответственно с четными и нечетными значениями объясняется тем, что расфазировка рассчитывалась по приближенной формуле.

Изменение ДН расфазированных рупоров также связано с изменением расфазировки. В отличие от синфазных эти рупоры не имеют четко выраженных боковых лепестков. Ширина их главного лепестка, определяемая, в основном, углом раствора рупора, от длины волны почти не зависит. Поэтому все расфазированные рупоры имеют очень широкий рабочий диапазон (их направленные свойства остаются почти неизменными при изменении частоты даже в несколько раз). Влияние апертуры расфазированных рупоров при изменении длины волны проявляется в том, что с увеличением ее относительного размера (при фиксированном угле раствора) уменьшается уровень бокового излучения, увеличивается крутизна скатов главного лепестка и изменяется форма его вершины. Это можно использовать для дополнительного улучшения данных параметров, в частности, для получения главного лепестка столбчатой формы с заданной формой вершины.

При расфазировке кратной нечетным целым значениям π наблюдается подъем, а четным — провал, рис. 1.7 [1], причем эти подъемы и провалы наиболее четко выражены в пл.Е.

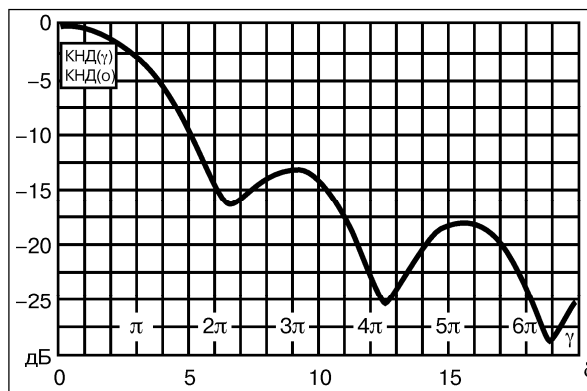


Рис. 1.6

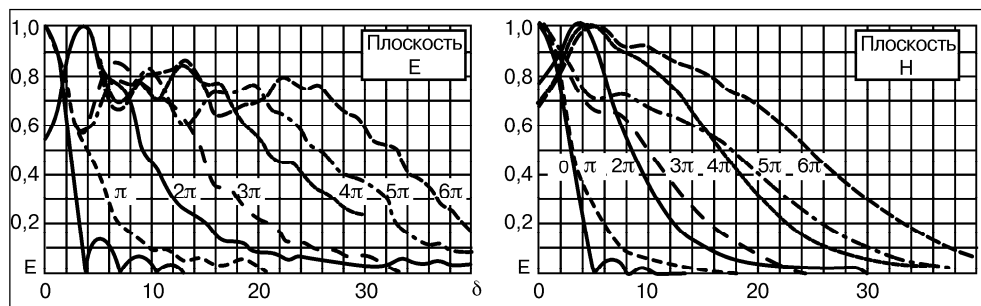


Рис. 1.7

Количество «горбов» с увеличением расфазировки увеличивается. Максимальная глубина осцилляций, наблюдаемая вблизи оси рупора, достигает ~ 6 дБ в пл.Е и ~ 3 дБ — в пл.Н. Зависимость формы вершины главного лепестка от величины расфазировки можно использовать при выборе оптимального варианта рупора, так как при расфазировке равной π (180°) главный лепесток имеет куполообразную форму, при $3\pi/2$ (270°) — плоскую, а при 2π (360°) — воронкообразную, причем с очень крутыми скатами главного лепестка, особенно в пл.Н.

1.3.4. Основные свойства синфазных и расфазированных рупоров

Основные электрические свойства синфазных рупоров:

1. Сравнительно узкий рабочий диапазон из-за сильной зависимости ширины главного лепестка и положения фазового центра от частоты.
2. Одинаковая форма вершины, но разная ширина главного лепестка на разных поляризациях, причем главный лепесток в пл. Е уже, чем в пл. Н.
3. Высокий уровень первых боковых лепестков (особенно в пл. Е).
4. Высокий общий уровень бокового излучения (особенно в пл. Е).
5. Куполообразная форма вершины и малая крутизна скатов главного лепестка, не позволяющие реализовать высокую эффективность в зеркальных антеннах, выполненных по классическим схемам.
6. Сравнительно плохое (при малых относительных размерах раскрыва) естественное согласование с питающим трактом.

Почти все перечисленные выше свойства синфазных рупоров, если эти рупоры используются в качестве облучателей, относятся к недостаткам, особенно в свете современных требований.

Основные электрические свойства расфазированных рупоров:

1. Очень широкий (многократный) рабочий диапазон из-за малой зависимости ширины главного лепестка и положения фазового центра от частоты, что является основным достоинством всех антенн, направленные свойства которых определяются не линейными, а угловыми размерами.
2. Разная форма вершины и разная ширина главного лепестка на разных поляризациях, но (в отличие от синфазных рупоров) главный лепесток в пл. Е шире, чем в пл. Н.
3. Низкий уровень первых (и ближних) боковых лепестков (особенно в пл. Н), которые четко не выражены.
4. Низкий общий уровень бокового излучения (особенно в пл. Н).

5. Возможность реализации (в зависимости от требований) «столообразного» (с крутыми скатами) главного лепестка и с разной формой вершины: куполообразной, плоской, воронкообразной.

6. Хорошее естественное согласование с питающим трактом, получаемое за счет большого относительного размера раскрыва.

Все перечисленные выше свойства расфазированных рупоров, исключая второе, можно (при использовании их в качестве облучателей) отнести к достоинствам.

Сравнение электрических свойств синфазных и расфазированных рупоров показывает:

Преимущества расфазированных рупоров (РР), обеспечиваемые за счет большой расфазировки при равной с синфазным рупором ширине главного лепестка:

- Несоизмеримо более широкий рабочий диапазон.
- Более низкий уровень бокового излучения.
- Более крутые скаты главного лепестка.
- Возможность получения главного лепестка с крутыми скатами и разной формой вершины (включая воронкообразную, которая во многих случаях является оптимальной) без усложнения конструкции рупора, а только за счет правильного выбора его геометрических размеров.
- Лучшее естественное согласование с питающим трактом.

Плата: значительное увеличение размера (по сравнению с синфазными рупорами с той же шириной главного лепестка ДН).

Основные конструктивные и технологические достоинства всех простейших рупорных антенн (синфазных и расфазированных, конических и пирамидальных): простота конструкции и изготовления (их можно изготовить даже в домашних условиях, по развертке).

Эти достоинства и обусловили широкое применение простейших рупорных антенн на заре развития антенной техники, когда простота конструкции и изготовления имели, зачастую, решающее значение. В настоящее время требования к электрическим параметрам всех антенн, включая рупорные, значительно возросли, а технологические возможности весьма расширились. Поэтому появились многочисленные, более сложные, модификации рупоров, включая и рупорные облучатели для зеркальных антенн определенного типа.

1.4. Облучатели для осесимметричных антенн

1.4.1. Рупоры с изломом (РИ)

Рупоры с изломом (РИ) могут быть и синфазными, и расфазированными. Образующая РИ может быть плавно изогнута или «изломана» скачком, причем не один раз. В месте излома может быть и ступенька, перпендикулярная оси рупора.

В общем случае РИ [6], рис. 1.8, представляет собой поверхность вращения с плавно искривленной (или «изломанной») образующей (А), направленной своей выпуклостью в сторону оси симметрии рупора. При этом величина угла раствора рупора в обла-

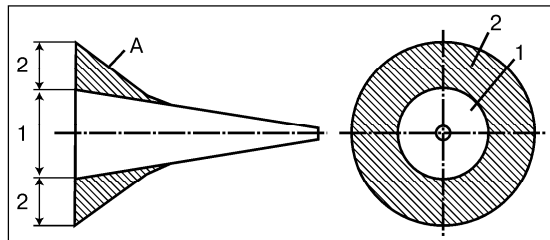


Рис. 1.8

сти, близкой к раскрыву, превышает величину угла в области, близкой к питающему волноводу, что и позволяет получить необходимый положительный эффект. В результате излома образующей поле в раскрыве рупора имеет две характерные области 1 и 2.

Область 1 является освещенной и закон распределения амплитуды поля в ней мало отличается от возбуждающего рупор первичного поля. Область 2 — теневая с весьма быстрым спаданием амплитуды поля по мере приближения к краю раскрыва, т.к. первичное поле в этой области затеняется выпуклостью искривленной стенки рупора. Поэтому распределение амплитуды поля в пл. Е и пл. Н (при правильном) выборе размеров рупора получается почти одинаковым, а ДН в пределах главного лепестка практически осесимметричной. Кроме того, из-за спадающего распределения уменьшается и уровень бокового излучения, особенно в плоскости Е.

Принцип работы РИ можно объяснить путем анализа волн высших типов, возникающих в области излома, и оценки их вклада в общее излучение рупора. Однако по сравнению с геометрикооптическим подходом, используемым в дальнейшем, такой подход значительно сложнее, менее нагляден и предпочтительнее для рупоров со ступенькой.

На основе излома образующей разработаны разные модификации рупоров, имеющих осесимметричный (и неосесимметричный) главный лепесток. Ниже в качестве примера приведен лишь один из синфазных рупоров с несколькими изломами образующей, а подробно рассмотрены разные модификации расфазированных рупоров.

Синфазные РИ, наряду с коническими секциями, имеют обычно и цилиндрические, которые иногда образуют на стыке ступеньку.

Преимущества синфазных рупоров, обеспечиваемые изломом и/или ступенькой: осесимметричный главный лепесток (обычно куполообразной формы) и низкий уровень бокового излучения.

Плата: усложнение конструкции, увеличение требований к точности изготовления и/или увеличение продольного размера, сужение рабочего диапазона.

Рабочий диапазон РИ, имеющих ступеньку, как правило, не более $\pm (0,5 \div 1,0) \%$. Сравнительно диапазоном ($\pm 6 \%$) является синфазный РИ [55], состоящий из нескольких секций с небольшим изменением угла раствора (рис. 1.9). Он менее требователен, чем другие синфазные РИ, к точности изготовления,

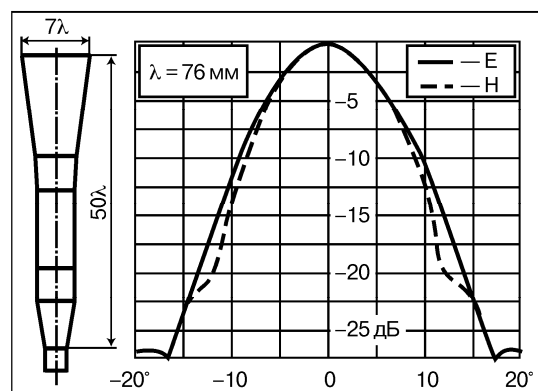


Рис. 1.9

но имеет очень большой продольный размер (50λ).

Синфазные РИ, насколько известно автору, широкого применения не нашли.

Расфазированные РИ (РРИ)

выгодно отличаются от других модификаций рупоров с осесимметричной ДН не только простотой конструкции, но и малыми требованиями к точности изготовления. Они представляют удачное сочетание основного (расфазированного) и малого (синфазного)

рупора, объединенных в единое целое таким образом, что его «суммарная» образующая имеет излом (или изгиб).

Расфазированный рупор «подарил» РРИ широкий рабочий диапазон, т.к. он как бы «сдерживает» присущее синфазному рупору перемещение фазового центра, не позволяя ему сместиться (с увеличением частоты) за пределы собственной геометрической вершины, а излом образующей обеспечил спадающее распределение амплитуды поля в пл.Е, почти одинаковое с пл.Н.

Преимущества РРИ, обеспечиваемые изломом образующей:

- Широкий рабочий диапазон (2÷3-кратный, причем при изменении частоты в ~1,5 раза ширина главного лепестка почти не меняется).
- Осевая симметрия главного лепестка при большой крутизне его скатов.
- Более низкий, чем у обоих «прародителей», общий уровень бокового излучения на обеих поляризациях.
- Возможность реализации одинаковой на обеих поляризациях заданной формы вершины главного лепестка (куполообразной, плоской, воронкообразной).
- Лучшее, чем у «прародителей» естественное согласование с питающим трактом.

Плата — увеличение относительных (в длинах волн) размеров.

Сочетание столь высоких электрических параметров при необычайной простоте конструкции и низких требованиях к точности изготовления не имеет, насколько известно автору, ни один рупор. А что касается платы за них большими размерами, то этот недостаток (при освоении высокочастотных диапазонов) может перейти в неоспоримое достоинство (см. раздел 1.9.2).

1.4.2. Определение оптимальных геометрических размеров расфазированных рупоров с изломом (РРИ)

Наибольшее практическое применение получили РРИ с резким изломом прямолинейной образующей, рис. 1.10. Это объясняется не только тем, что их легче изготовить, но и тем, что оптимальные геометрические размеры таких РРИ весьма легко и достаточно точно определяются по простым формулам или рассчитанным по ним графикам [15].

Вывод этих формул рассмотрен здесь применительно к коническому РРИ с круглым раскрывом. Но по этим же формулам можно (с достаточной для практических целей точностью) определить

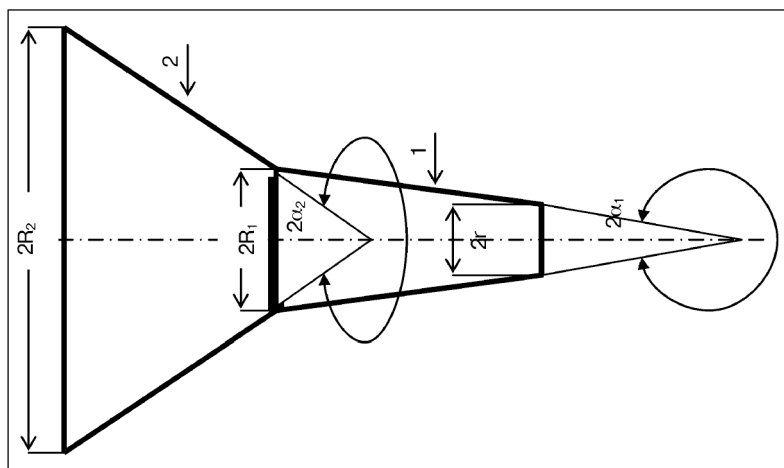


Рис. 1.10

оптимальные размеры других модификаций РРИ, хотя для них аналогичным образом могут быть выведены и свои, более точные, формулы.

Конический РРИ (см. рис. 1.10), как и все другие рупоры этого типа, состоит из двух рупоров. Это малый (синфазный) рупор 1 и основной (расфазированный) рупор 2. Именно на свойствах данных рупоров (синфазного и расфазированного) базируется вывод приближенных формул, позволяющих определить все основные геометрические размеры рупора, имеющего осесимметричный главный лепесток требуемой ширины с заданной формой вершины. Геометрические размеры РРИ могут варьироваться в широких пределах в зависимости от требований, предъявляемых к антенне, и геометрии ее зеркала (вспомогательного и/или основного).

Основные геометрические размеры РРИ, необходимые для его изготовления (см. рис. 1.10):

$2r$ — диаметр сечения волновода;

$2\alpha_1$ — угол раствора малого, синфазного, рупора;

$2R_1$ — диаметр сечения излома («раскрыва») малого, синфазного, рупора;

$2\alpha_2$ — угол раствора основного, расфазированного, рупора;

$2R_2$ — диаметр раскрыва основного, расфазированного, рупора.

Исходные параметры, которыми необходимо задаваться при определении оптимальных размеров РРИ, если он используется в качестве облучателя зеркальных антенн:

$N_{дБ}$ — уровень облучения кромки зеркала (основного или вспомогательного),

$2\theta_{кз}$ — угол облучения кромки зеркала (основного или вспомогательного).

Если антенна оптимизируется по эффективности, то, как показали расчеты и экспериментальные исследования, оптимальным уровнем облучения кромки зеркала при использовании РРИ является уровень $N_{дБ} \approx -(10 \div 12)$ дБ, что соответствует $\alpha_2 \approx \theta_{кз}$. При этом расчетное значение КИП антенны составляет, как правило, порядка $0,7 \div 0,8$, а экспериментальное — $0,6 \div 0,7$, но могут быть достигнуты и более высокие значения.

Если антенна оптимизируется по помехозащищенности, то уровень облучения кромки можно уменьшить до $N_{дБ} \approx -(15 \div 17)$ дБ, что соответствует $\alpha_2 \approx (0,8 \div 0,9) \theta_{кз}$, но КИП при этом может снизиться до $\sim 0,5$.

При использовании РРИ в антеннах с модифицированным профилем зеркал уровень облучения кромки модифицированного зеркала можно снизить до $N_{дБ} \approx -(15 \div 17)$ дБ без уменьшения эффективности антенны, а помехозащищенность при этом значительно увеличится.

При использовании РРИ в двухзеркальных антеннах, на вспомогательном зеркале которых установлен фланец, уровнем $N_{дБ} \approx -(15 \div 17)$ дБ следует облучать края фланца, увеличив уровень облучения края вспомогательного зеркала до $N_{дБ} \approx -(6 \div 8)$ дБ ($\alpha_2 \approx (1,1 \div 1,2) \theta_{кз}$), что позволит дополнительно повысить КИП.

Угол раствора основного рупора $2\alpha_2$, исходя из перечисленных выше требований, предъявляемых к антенне, должен лежать в пределах: $2\alpha_2 \approx 2\theta_{кз} \pm 20\%$.

Внимание! В однозеркальных антеннах при использовании немодифицированных зеркал наиболее оптимальным вариантом, позволяющим получить высо-

кую эффективность при хорошей помехозащищенности, является $2\alpha_2 \approx 2\theta_{кз}$.

Ограничение угла раствора основного рупора ($2\alpha_2$) определяется возможностью реализации с его помощью осесимметричного главного лепестка определенной ширины.

Со стороны малых углов ограничение вызывается конструктивными и технологическими трудностями, связанными с изготовлением очень длинных рупоров (размеры РРИ, особенно продольные, очень быстро возрастают с уменьшением угла $2\alpha_2$, влекущего за собой и уменьшение и $2\alpha_1$).

Со стороны больших углов ограничение связано с уменьшением влияния стенок основного рупора на формирование главного лепестка, так как $2\alpha_2$ (в пределе) не может быть больше ширины главного лепестка по нулям питающего рупор волновода, когда требуемый размер раскрыва малого рупора «вырождается» приближается к сечению волновода.

На практике $2\alpha_2$ выбирается обычно в пределах: $20^\circ \leq 2\alpha_2 \leq 90^\circ$. При необходимости он может быть увеличен до $120^\circ \div 140^\circ$, но с меньшим полезным эффектом и/или при уменьшенном сечении волновода, что влечет за собой ухудшение согласования.

Если $2\alpha_2 = 180^\circ$, то основной рупор «вырождается» во фланец, установленный перпендикулярно оси малого рупора, который, в свою очередь, «вырождается» в волновод, и лишь несколько снижает уровень его излучения в заднем полупространстве, не оказывая практически никакого влияния на главный лепесток.

Выбранное значение $2\alpha_2$ является базовым и закладывается в основу расчета всех остальных размеров РРИ, рис. 1.11.

Размер раскрыва основного рупора $2R_2$ задает (при выбранном значении $2\alpha_2$) степень его расфазировки, которая, в свою очередь, определяет форму вершины и крутизну скатов главного лепестка РРИ.

Расфазировка рупора 2 определяется не только его размерами, но и расстоянием (S_p), на котором формируется оптимальная ДН, если это расстояние не удовлетворяет условию дальней зоны. Поэтому, наряду с собственной расфазировкой рупора ($\Delta\varphi_p$), следует учитывать и расфазировку из-за расстояния ($\Delta\varphi_s$), т. е. полную суммарную расфазировку ($\Delta\varphi_\Sigma$).

Значение расфазировки в данном случае должно быть рассчитано по точной формуле (1.1), которая применительно к РРИ имеет следующий вид:

$$\Delta\varphi_\Sigma = \Delta\varphi_p + \Delta\varphi_s, \quad (1.7)$$

где $\Delta\varphi_p = 2\pi (L_2 - H_2)/\lambda$; $\Delta\varphi_s = 2\pi (S_k - S_p)/\lambda$, L_2 — длина образующей основного рупора до его геометрической вершины; H_2 — высота основного рупора до его геометрической вершины; S_k — расстояние от кромки рупора до точки

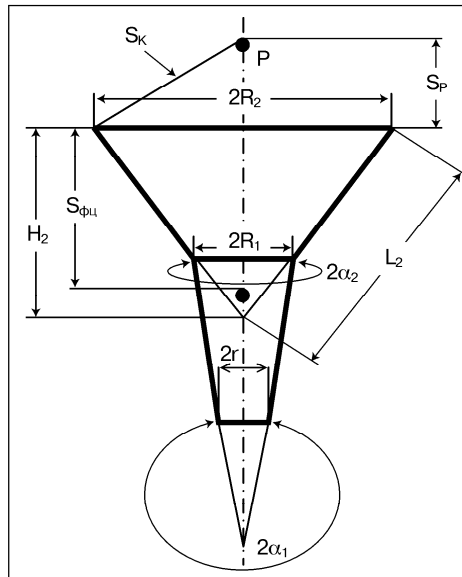


Рис. 1.11

наблюдения Р; S_p — расстояние от плоскости раскрыва рупора до точки наблюдения Р; λ — длина волны.

При использовании рупора в качестве облучателя за точку наблюдения Р выбирается обычно точка, расположенная на расстоянии примерно равном расстоянию от плоскости раскрыва рупора до плоскости, проходящей через вершину или кромки облучаемого зеркала (основного или вспомогательного) или средней между ними величине.

В антенне, выполненной по двухзеркальной схеме, рупор может быть расположен очень близко к вспомогательному зеркалу. В этом случае расстояние от плоскости рупора до плоскости, проходящей через вершину зеркала, и плоскости, проходящей через его кромки, может отличаться очень сильно. В этом случае желательно учитывать изменение формы вершины главного лепестка в пределах изменения этого расстояния и, если это возможно, формировать форму вершины главного лепестка с учетом разности этих расстояний. Во многих случаях с целью увеличения эффективности целесообразно реализовать воронкообразную форму ДН на расстоянии S_p , равном расстоянию от плоскости раскрыва рупора до плоскости, проходящей через кромки зеркала.

В антеннах, где рупор располагается вблизи зеркала, величина $\Delta = \varphi_s$ может вносить весьма существенный вклад в суммарную расфазировку рупора, что позволяет получить желаемый эффект при значительно меньших размерах, чем в случае его нахождения в дальней зоне. И этим не следует пренебрегать при выборе схемы и геометрических размеров зеркальной антенны.

Форма главного лепестка РРИ (в отличие от обычного РР) в пл. Е и Н практически совпадает, приближаясь к форме главного лепестка РР в плоскости Н (см. рис. 1.7, справа), и определяется величиной $\Delta\varphi_\Sigma$.

Радиус раскрыва основного рупора R_2 при заданном значении расфазировки, соответствующей выбранной форме вершины главного лепестка и крутизне его скатов, определяется по следующей формуле:

$$R_2 = \frac{\left(S_p + \frac{n}{2}\lambda \right) \lg \frac{\alpha_2}{2} + \left[\left(S_p + \frac{n}{2}\lambda \right)^2 \cdot \lg^2 \frac{\alpha_2}{2} + \frac{n}{2}\lambda \cdot \left(1 - \lg^2 \frac{\alpha_2}{2} \right) \cdot \left(2S_p + \frac{n}{2}\lambda \right) \right]^{1/2}}{1 - \lg^2 \frac{\alpha_2}{2}}, \quad (1.8)$$

где $n = 1; 1,5; 2...$

Для получения куполообразной формы вершины главного лепестка $\Delta\varphi_\Sigma$ должна быть кратной нечетным целым значениям π ($n = 1; 3...$), для получения плоской вершины — нечетному количеству $0,5\pi$ ($n = 1,5; 3,5 ...$), т. е. отличаться от целых значений π на $0,5\pi$; для получения воронкообразной — быть кратной четным целым значениям π ($n = 2; 4...$).

Напомним, что с возрастанием n увеличивается крутизна скатов главного лепестка и уменьшается уровень боковых лепестков, но увеличиваются геометрические размеры рупора, что не всегда допустимо. Поэтому в большинстве практических случаев n выбирается в пределах $1 \div 4$.

На рис. 1.12 приведены графики для значения $n=2$, соответствующего наиболее оптимальной (воронкообразной) форме главного лепестка, по которым можно определить R_2 , исходя из выбранных ранее значений α_2 и S_p .

На рис. 1.13, 1.14 и 1.15 приведены графики для разных значений n : 1 и 1,5; 2,5 и 3; 3,5 и 4, соответственно.

Как следует из графиков, с уменьшением S_p и увеличением α_2 геометрические размеры оптимальных РРИ резко уменьшаются. И для малых расстояний (S_p) необходимая расфазировка может быть получена уже при размере раскрыва рупора раза в два меньшем, чем для дальней зоны. В некоторых случаях это может стать решающим фактором при выборе схемы антенны. Однако при $S_p \leq R_2$ данная методика становится менее точной, а при S_p близких к нулю, ею пользоваться во многих случаях вообще нельзя.

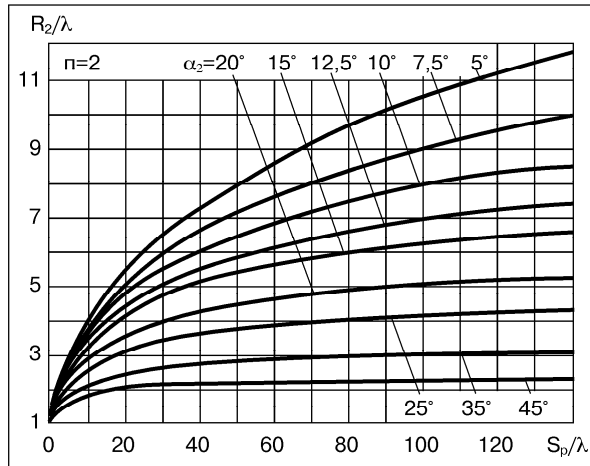


Рис. 1.12

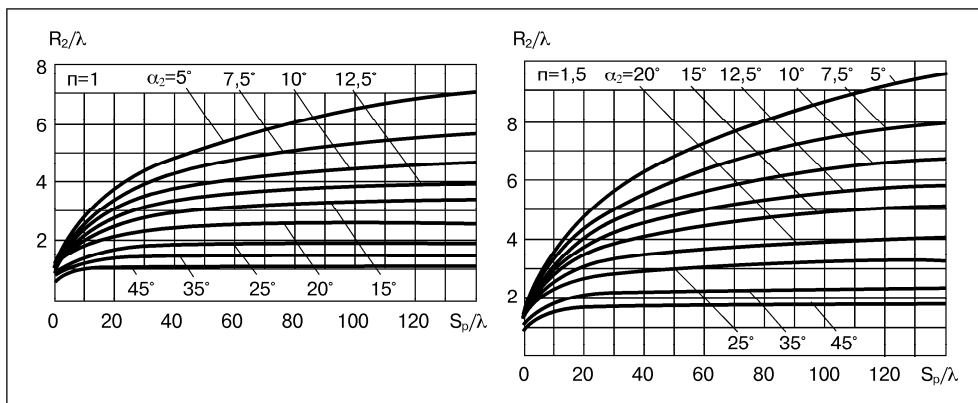


Рис. 1.13

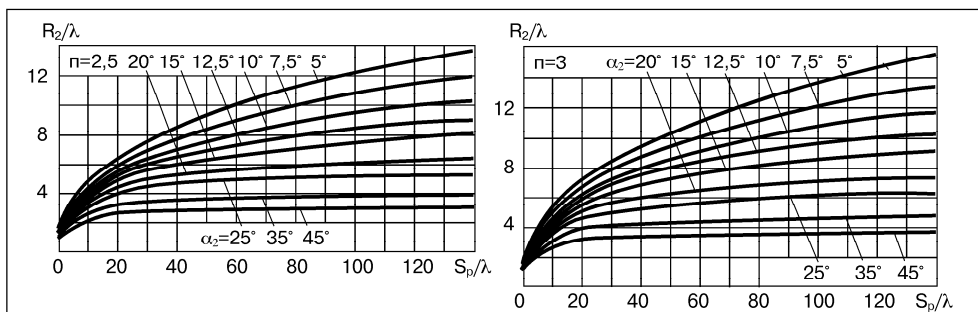


Рис. 1.14

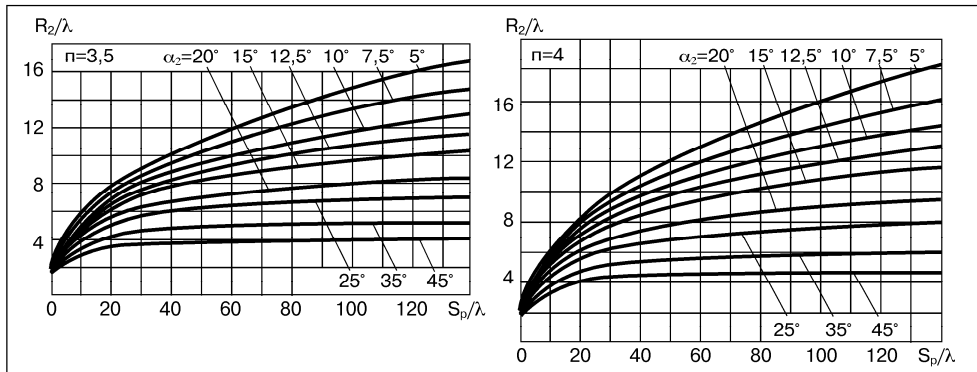


Рис. 1.15

Если $S_p \rightarrow \infty$, то (1.8) приобретает очень простой вид:

$$R_2 = (n \operatorname{ctg}(\alpha_2/2))/2. \quad (1.9)$$

Радиус раскрыва малого рупора R_1 (радиус сечения излома) можно определить по очень простой, но чисто эмпирической и весьма приближенной формуле, которая здесь приведена в более удобном виде, чем в [12]:

$$R_1 = r + \lambda \sin(\alpha_1)/4\alpha_1 \sin(\alpha_2 - \alpha_1), \quad (1.10)$$

где r — радиус волновода, а значение α_1 с коэффициентом 4, приведенное в знаменателе, должно быть задано в радианах.

Можно определить R_1 и по более точной, но также приближенной формуле, вывод которой базируется на следующих рассуждениях.

Если малый синфазный рупор рассматривать как самостоятельный излучатель, что при $R_2 > R_1$ допустимо, то ширину его главного лепестка по нулям (без учета влияния стенок основного рупора) можно рассчитать по (1.3) и (1.4), действительным для дальней зоны. В пл. Е применительно к коническому рупору формула (1.3) имеет следующий вид:

$$2\theta_0 = 2 \operatorname{arsin}(1,22\lambda/2R_1). \quad (1.11)$$

Для получения в пл. Е раскрыва РРИ спадающего распределения амплитуды поля необходимо, чтобы облучение края раскрыва основного рупора из центра раскрыва малого рупора осуществлялось по уровню, близкому к нулевому, т.е. соблюдалось условие:

$$2\theta_0 = 2\theta_k, \quad (1.12)$$

где θ_k — угол, под которым видна кромка раскрыва основного рупора из фазового центра малого рупора (полагаем, что фазовый центр малого рупора расположен в его раскрыве, т.е. в сечении излома), определяется исходя из геометрии рупора:

$$2\theta_k = 2 \operatorname{arsin}\{R_2 \operatorname{tg}(\alpha_2) [(R_2 - R_1)^2 + R_2^2 \operatorname{tg}^2 \alpha_2]^{-1/2}\}. \quad (1.13)$$

Согласно формулам (1.11) — (1.13):

$$1,22\lambda/R_1 = R_2 \operatorname{tg}(\alpha_2) [(R_2 - R_1)^2 + R_2^2 \operatorname{tg}^2 \alpha_2]^{-1/2}. \quad (1.14)$$

При $R_1 < R_2$ (в зависимости от выбранных ранее значений R_2 и α_2) определяется следующим выражением:

$$R_1 = R_2 [1 - (1 - q \cos^2 \alpha_2)^{1/2}] / q, \text{ где } q = 1 - (1,64\lambda / R_2 \operatorname{tg}^2 \alpha_2)^2. \quad (1.15)$$

На рис. 1.16 показана зависимость радиуса раскрыва малого рупора R_1 от радиуса раскрыва основного рупора R_2 , рассчитанная по (1.15).

При приближении сечения излома к сечению волновода точность (1.15) уменьшается и тогда при определении R_1 следует пользоваться точными или приближенными формулами, используемыми для расчета ДН волновода [1].

ДН для трех разных сечений ($2r=2a$) круглого волновода (волна H_{11}) [1] показаны на рис. 1.17.

При $2a=1,5\lambda$ (слева) главный лепесток в пл.Е имеет ярко выраженный минимум при $\theta \approx 55^\circ$, что делает возмож-

ным реализацию оптимального РРИ с углом раствора $2\alpha_2 \approx 110^\circ$. Однако при дальнейшем уменьшении 2α минимумы заплывают, а скат главного лепестка становится все более пологим, что затрудняет реализацию РРИ с осесимметричной ДН.

При $2a=\lambda$ (в центре) еще прослеживается некоторая возможность синтеза сравнительно оптимального РРИ с $2\alpha_2 \approx 120^\circ \div 140^\circ$. Но при $2a=0,7\lambda$ (справа) такая возможность практически пропадает. В этом случае главный лепесток по уровню 0,4 в пл. Е и пл. Н совпадает, а затем ДН в пл. Е становится шире, чем в пл. Н, что делает бессмысленным использование в таком волноводе конической насадки, так как ее кромка будет облучаться в пл. Е более высоким уровнем, чем в пл.Н со всеми вытекающими негативными последствиями. Это и ограничивает возможность создания оптимальных РРИ с углами раствора $2\alpha_2 \geq 140^\circ \div 160^\circ$.

Угол раствора малого рупора $2\alpha_1$ выбирается таким образом, чтобы фазовое распределение в раскрые рупора мало отличалось от синфазного. При допустимой фазовой ошибке в раскрые малого рупора $\Delta\varphi \leq \pi/8$, получаем:

$$\alpha_1 \leq 2 \arctg(\lambda/16R_1). \quad (1.16)$$

Внимание! При реализации широкодиапазонных РРИ $2\alpha_1$ следует выбирать как можно меньше, чтобы обеспечить стабилизацию фазового центра в более широком диапазоне частот. Если же рупор предназначен для работы в сравни-

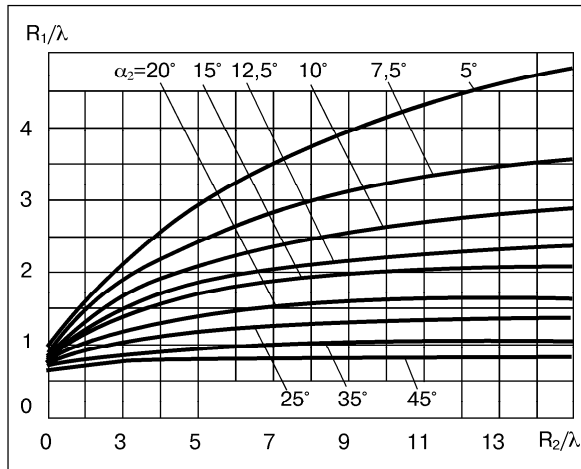


Рис. 1.16

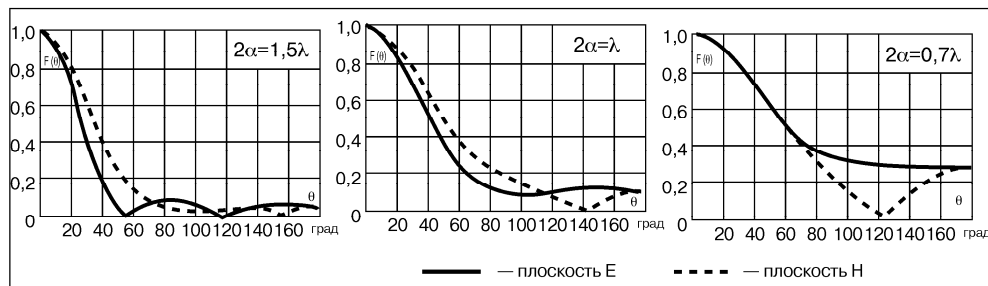


Рис. 1.17

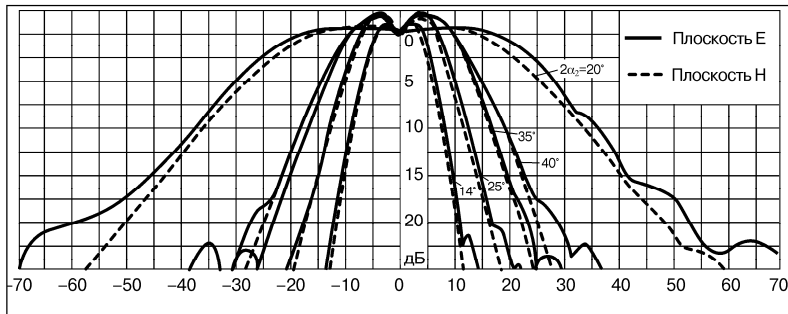


Рис. 1.18

тельно узком диапазоне частот, то допустимая фазовая ошибка может быть увеличена до $\pi/4$.

Фазовый центр РРИ расположен

примерно между сечением излома и геометрической вершиной основного рупора, а расстояние от него до раскрыва основного рупора ($S_{\text{фц}}$) определяется по (1.17):

$$S_{\text{фц}} = (R_2 - 0,5R_1) / \tan \alpha_2. \quad (1.17)$$

Экспериментальные исследования подтвердили возможность использования изложенной выше методики для определения геометрических размеров РРИ, оптимизированных для заданного диапазона частот.

На рис. 1.18 приведены ДН рупоров с разными углами раствора (14° , 25° , 35° , 40° и 80°), но одинаковой суммарной расфазировкой ($\sim 2\pi$).

ДН всех этих рупоров, несмотря на различие углов основного рупора, имеют почти осесимметричный главный лепесток, идентичную (воронкообразную) форму вершины, соответствующую выбранной расфазировке (четным значениям n), и низкий уровень боковых лепестков, но отличаются шириной главного лепестка, определяемой углом $2\alpha_2$.

На рис. 1.19 — 1.22 показаны измеренные почти в 3-х кратном диапазоне волн ($4,0 \div 11,0$ мм) ДН РРИ, оптимизированного для $\lambda_0 = 8,5$ мм.

Размеры рупора: (см. рис. 1.11): $2r = 0,85\lambda_0$; $2R_1 = 2,85\lambda_0$; $2\alpha_1 = 10^\circ$; $2R_2 = 8,94\lambda_0$; $2\alpha_2 = 35^\circ$. Измерения проводились на расстоянии $S_p = 30\lambda_0$ при вращении рупора вокруг фазового центра ($S_{\text{фц}} = 11,76\lambda_0$). При этом на λ_0 суммарная расфазировка основного рупора $\Delta\varphi_\Sigma = 2\pi$, а собственная расфазировка малого $\Delta\varphi_p = 0,124\pi$.

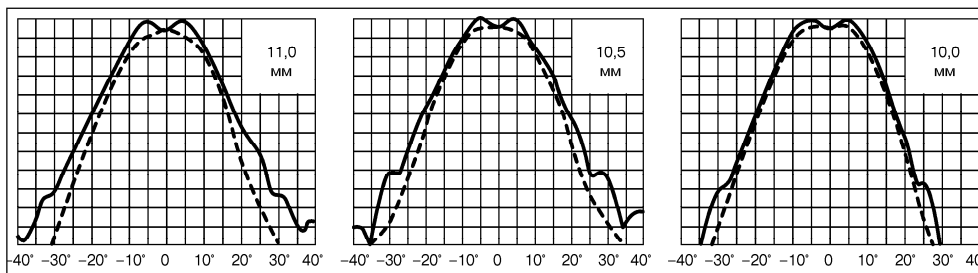


Рис. 1.19

На рис. 1.19 приведены ДН для волн 11,0 мм, 10,5 мм и 10,0 мм, где $\Delta\varphi_\Sigma$ соответственно равна $1,57\pi$, $1,64\pi$ и $1,72\pi$.

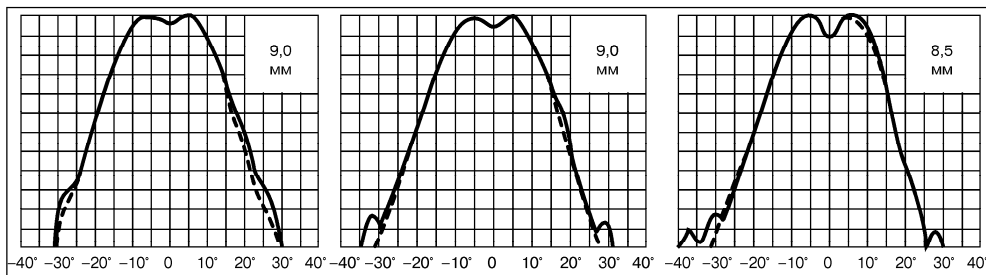


Рис. 1.20

На рис. 1.20 приведены ДН для волн 9,5 мм, 9,0 мм и 8,5 мм, где $\Delta\varphi_{\Sigma}$ соот-

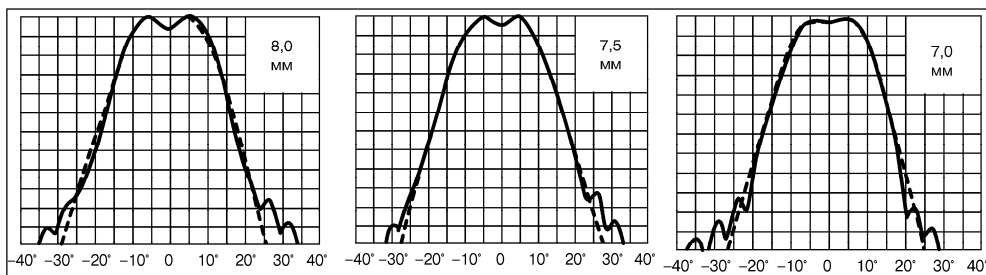


Рис. 1.21

ветственно равна $1,82\pi$, $1,91\pi$ и $2,03\pi$.

На рис. 1.21 приведены ДН для волн 8,0 мм, 7,5 мм и 7,0 мм, где $\Delta\varphi_{\Sigma}$ соответственно равна $2,15\pi$, $2,30\pi$ и $2,46\pi$.

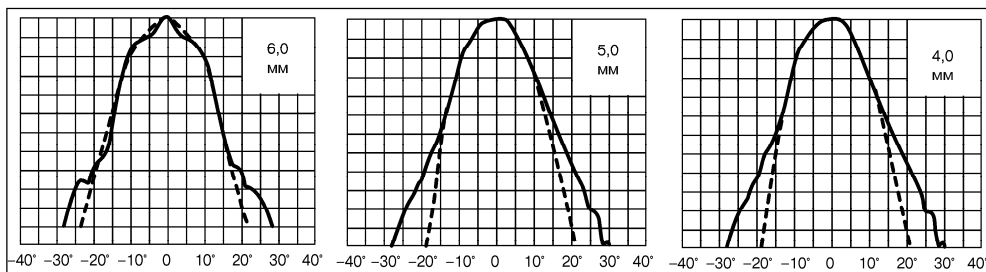


Рис. 1.22

На рис. 1.22 приведены ДН для волн 6,0 мм, 5,0 мм и 4,0 мм, где $\Delta\varphi_{\Sigma}$ соответственно равна $2,88\pi$, $3,45\pi$ и $4,32\pi$.

Анализ ДН показывает, что при изменении длины волны в 1,36 раза ($7,0 \div 9,5$ мм) форма вершины главного лепестка меняется незначительно, а ширина (до уровня ~ -20 дБ) остается почти неизменной. При изменении длины волны почти в 3 раза ширина главного лепестка меняется только в 1,5 раза. При этом в сторону более длинных волн (за пределами показанного здесь диапазона) ДН постепенно приближается к ДН обычного РР, в режиме которого рупор продолжает работать до тех пор, пока его суммарная расфазировка достаточно велика ($\Delta\varphi_{\Sigma} \geq 4\pi/3$).

Таким образом, возможный рабочий диапазон РРИ в качестве облучателя со стороны длинных волн (при соответствующей расфазировке) ограничивается критическим размером питающего рупор волновода. Со стороны коротких — допустимым сужением главного лепестка ДН, ширина которого уменьшаться с уменьшением длины волны из-за сужения ширины главного лепестка малого, синфазного, рупора, расфазировка которого и смещение фазового центра могут, однако, оставаться в допустимых пределах при уменьшении длины волны в $1,5 \div 2,0$ раза. При этом помехозащищенность и самого рупора, и антенны, в которой он используется в качестве облучателя, увеличивается.

Область применения методики расчета геометрических размеров оптимальных рупоров весьма широка, так как приведенные выше формулы и графики можно использовать для определения оптимальных размеров не только конических РРИ, но и пирамидальных, а также тех и других с канавками, диэлектрическими втулками, косым срезом раскрыва и/или поворотом оси. Подробнее об этом будет сказано в соответствующих разделах.

1.4.3. Рупоры с канавками (РК)

Рупоры с канавками (РК) разных модификаций выполняют как на базе синфазных, так и на базе расфазированных рупоров. Канавки, рис. 1.23, вырезанные на стенках рупора, представляют собой импедансную структуру и работают по принципу антенн поверхностных волн.

Они, «отжимая» поле от стенок, создают в пл. Е спадающее распределение амплитуды поля, аналогичное полю в пл. Н, обеспечивая осевую симметрию главного лепестка, рис. 1.24 [2], и уменьшение уровня бокового излучения.

Многочисленные модификации РК конструктивно значительно отличаются друг от друга. Они могут иметь (см. рис. 23) разный угол раствора (2α), разную длину образующей (r) и конфигурацию канавок (например, прямоугольную, треугольную, трапециидальную).

Канавки могут быть кольцевыми или спиральными, нарезанными перпендикулярно оси рупора или перпендикулярно его стенкам.

Глубина канавок (d) может быть равной или плавно меняющейся. Разной может быть и ширина канавок, и ширина выступов (t), задающих их шаг (s), который обычно делают равным $\lambda/4$.

В широких пределах может меняться и количество канавок, определяющее

уровень симметрирования, различно и их расположение внутри рупора. РК могут отличаться и технологией изготовления, и многими другими тонкостями. Однако общим для всех РК является то, что глубина рабочих канавок должна быть примерно равной (или кратной) $\lambda/4$.

Основная задача при разработке РК состоит в том, чтобы при наименьшем количестве канавок (обычно не больше 10-ти) получить максимально возможный желаемый эффект без или с минимально возможным ухудшением остальных параметров, особенно согласования, которое ухудшается из-за отражения поля от канавок.

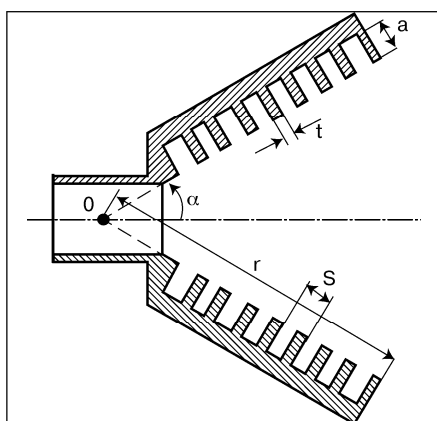


Рис. 1.23

Значительного ухудшения согласования рупора с питающим волноводом можно избежать [1], если сделать канавки спирально разворачивающимися или с плавно меняющейся глубиной [19].

Преимущества РК (по сравнению с обычным гладким рупором), определяемые наличием канавок: осевая симметрия главного лепестка и уменьшение уровня бокового излучения, но только в диапазоне действия канавок.

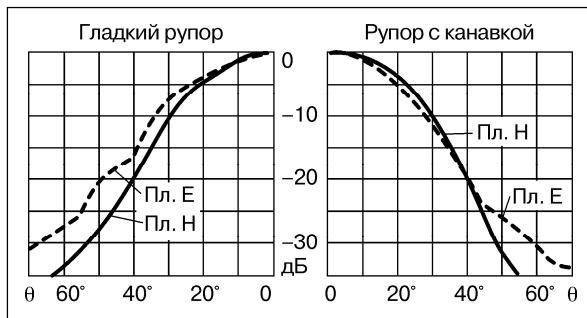


Рис. 1.24

Плата: ухудшение согласования с питающим трактом, значительное усложнение конструкции, повышение требований к точности изготовления (размеры канавок должны быть выдержаны с высокой точностью), ограничение по мощности.

Синфазные РК, как и базовые, сохраняют сильную зависимость ширины главного лепестка от частоты не только за пределом действия канавок, где ширина главного лепестка на разных поляризациях вновь становится разной, но и в пределах их действия, что является недостатком.

Расфазированные РК, как и базовые, сохраняют широкий рабочий диапазон, что является достоинством, хотя за пределами действия канавок, главный лепесток на разных поляризациях, как и базовых рупоров, отличается по ширине.

Конструктивным недостатком расфазированных РК (по сравнению с синфазными), как и их аналогов с гладкими стенками, являются большие относительные размеры.

Расфазированные рупоры с изломом и канавками (РРИК) могут иметь и криволинейную образующую, имеющую плавный изгиб, рис. 1.25. Канавки могут быть расположены как внутри рупора [34], [19], так и на его внешнем фланце [50], причем фланец (вернее, дополнительная насадка) может иметь прямолинейную [45], или криволинейную [52] образующую.

Для достижения существенного дополнительного эффекта в РРИ (в отличие от обычного РР) достаточно нарезать всего 5÷6 канавок, а равный с гладким РРИ эффект может быть достигнут при значительно меньших размерах РРИК.

РРИК с внутренними канавками, расположенными между изломом и раскрытием (см. рис. 1.25 и рис. 1.26), имеет (по сравнению с таким же по размерам РРИ без канавок) большую крутизну скатов главного лепестка и меньший уровень бокового излучения. Это вызвано тем, что канавки дополнительно уменьшают величину поля в уже «затененной» изломом области (на рис. 1.26 она заштрихована).

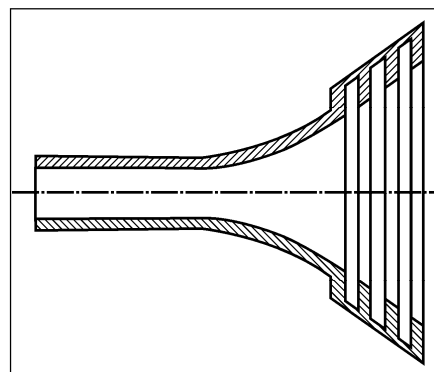


Рис. 1.25

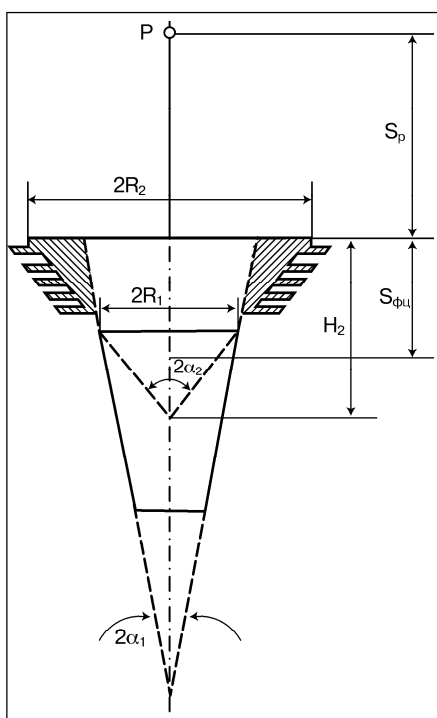


Рис. 1.26

Экспериментальные ДН РР, РРИ и РРИК в пл. Е (сплошная линия) и в пл. Н (пунктир), измеренные на частоте 11,2 ГГц, показаны на рис. 1.27

Все три рупора имеют одинаковый размер раскрытия и угол раствора ($2R_2 = 5,6\lambda$, $2\alpha_1 = 70^\circ$). Остальные размеры РРИ и РРИК также одинаковы ($2R_1 = 1,9\lambda$, $2\alpha_2 = 14^\circ$). Но на стенках РРИК нарезано 6 канавок, глубина которых плавно уменьшается по мере приближения к раскрытию от $\lambda/2$ до $\lambda/4$. ДН измерены на расстоянии $S_p \approx 0,67\lambda$ при вращении рупора вокруг фазового центра (для РРИ и РРИК $S_{фц} \approx 3,4\lambda$).

Анализ ДН показывает (см. рис. 1.27), что главный лепесток РР (а) не обладает осевой симметрией, а РРИ (б) практически осесимметричен до уровня ~ -25 дБ. Главный лепесток РРИК (в) имеет очень крутые скаты и в пл. Е он даже уже, чем в пл. Н (т. е. влияние канавок оказалось слишком сильным). Дополнительно уменьшился и уровень бокового излучения в пл. Е. (он здесь не показан).

Форма вершины главного лепестка (см. рис. 1.27) РРИ и РРИК немного отличается. Это связано с уменьшением эффективно излучающего раскрытия ($2R_{2э}$).

Здесь и далее индекс «э» означает, что эти обозначения относятся к гипотетическому «эквивалентному» рупору с размерами $R_{2э}$, $H_{2э}$, $S_{Рэ}$ и $\Delta\varphi_{\Sigmaэ}$.

На рис. 1.28 приведены экспериментальные ДН РРИ, РРИКР (РРИ с канавками равной глубины) и РРИКП (с канавками переменной глубины), измеренные на частоте 8,15 ГГц в пл. Е (влияние канавок на ДН в пл. Н незначительно, поэтому они здесь не приводятся). Измерения этих ДН проводились на конечном (заданном) расстоянии от раскрытия, где суммарная расфазировка (для РРИКР и РРИКП — эквивалентная) одинакова и равна $\sim 2\pi$.

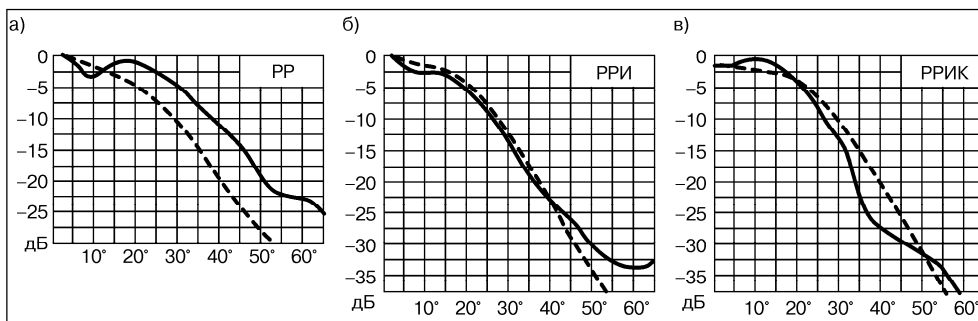


Рис. 1.27

Размеры: $2\alpha_2=48^\circ$, $2R_1 = 1,9\lambda$, $2\alpha_1=12^\circ$ всех трех рупоров равны. Размер раскрыва РРИ ($2R_2 = 4,1\lambda$) отличается от РРИКР и РРИКП, имеющих одинаковый раскрыв ($2R_2 = 4,4\lambda$). Раскрыв этих рупоров по абсолютному размеру несколько больше раскрыва РРИ, а по эквивалентному (действующему) примерно равен ему.

РРИКР имеет 2 концентрические канавки с шагом и глубиной $\lambda/4$, нарезанные перпендикулярно его оси. РРИКП — 4-е концентрические канавки с шагом $\lambda/4$ и переменной глубиной линейно увеличивающейся от $\lambda/4$ до $\lambda/2$ по мере удаления от раскрыва. Следствием равенства эквивалентных раскрывов является то, что все три рупора имеют одинаковую форму вершины главного лепестка, примерно соответствующую расфазировке, равной 2π , а уровень поля в направлении угла α_2 составляет $\sim -(11 \div 14)$ дБ.

Сравнение (см. рис. 1.28) показывает, что две равноглубокие канавки по своему действию на ДН примерно равноценны четырем неравноглубоким. При этом РРИКР и РРИКП имеют (по сравнению с РРИ) большую крутизну скатов главного лепестка и более низкий уровень бокового излучения (он не показан).

Коэффициент отражения (Γ , %) РР, РРИ и РРИК, измеренный в диапазоне $10,5 \div 11,9$ ГГц, приведен на рис. 1.29.

Наиболее высокий коэффициент отражения (при равных геометрических размерах основного рупора) имеет обычный РР, наиболее низкий — РРИ.

Коэффициент отражения РРИК, значительно ниже обычного РР и всего лишь на доли процента выше коэффициента отражения РРИ с гладкими стенками, что достигается переменной глубиной канавок и их расположением в теневой зоне (см. рис. 1.26).

Канавки (для улучшения согласования) могут либо уменьшаться (по мере приближения к раскрыву) от $\lambda/2$ до $\lambda/4$, как это сделано у рассматриваемого РРИК, либо увеличиваться от 0 до $\lambda/4$. Возможно использование и спирально-развертывающихся канавок.

На рис. 1.30 показаны коэффициенты отражения РРИ, РРИКП и РРИКР, измеренные в диапазоне $7,7 \div 10,3$ ГГц.

Здесь наблюдается примерно та же зависимость, что и в предыдущем случае. Коэффициенты отражения РРИ и РРИКП почти одинаковы, а коэффициент отражения РРИКР несколько выше и первого, и второго. Следовательно, большее (отрицательное) влияние оказывают равноглубокие канавки.

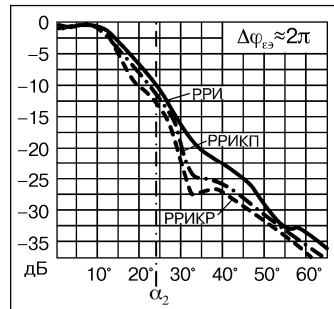


Рис. 1.28

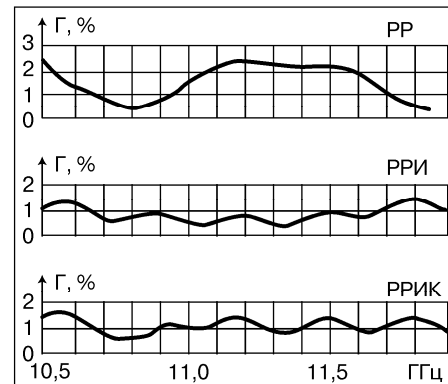


Рис. 1.29

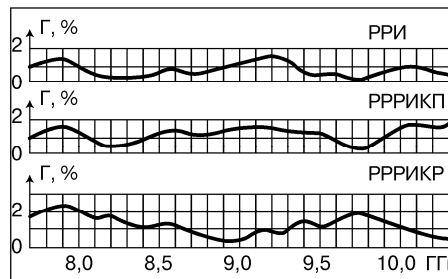


Рис. 1.30

Определение оптимальных геометрических размеров РРИК базируется на простых эмпирических правилах:

- Эквивалентный раскрыв РРИКР (РРИ с канавками равноглубокими, четвертьволновыми) примерно соответствует диаметру, на котором расположена 1-я или 2-я (со стороны горла рупора) канавка.
- Эквивалентный раскрыв РРИКП (РРИ с канавками переменной глубины, которая уменьшается до $\lambda/4$ по мере приближения к раскрыву) соответствует диаметру, на котором расположена канавка с глубиной, отличающейся от $\lambda/4$ в 1.3÷1.4 раза.

Для приближенного определения оптимальных геометрических размеров РРИК с заданной формой и шириной главного лепестка можно пользоваться методикой, изложенной в разделе 1.4.2 для РРИ с гладкими стенками, заменив соответствующие величины эквивалентными.

Преимущества РРИК (по сравнению с РРИ), определяемые канавками: увеличение глубины осевой симметрии главного лепестка и дополнительное уменьшение уровня бокового излучения, но только в диапазоне влияния канавок.

Плата: усложнение конструкции, повышение требований к точности изготовления, некоторое ухудшение согласования с питающим трактом, если не приняты специальные меры.

РРИ, снабженный насадкой с канавками (РРИнк), рис. 1.31, как и обычный РРИ, содержит две основные секции: малый, синфазный, рупор 1 диаметром $2R_1$ и углом раствора $2\alpha_1$; основной, расфазированный, рупор 2 диаметром $2R_2$ и углом раствора $2\alpha_2$. Кроме того, в отличие от РРИ, имеется и секция 3 — насадка с углом раствора $2\alpha_3$, на которой нарезаны канавки.

Секции 1 и 2 представляют собой РРИ с гладкими стенками, отличающийся, как и все другие рупоры этого типа, осевой симметрией главного лепестка, низким уровнем бокового излучения и хорошим естественным согласованием с питающим трактом.

Угол раствора насадки ($2\alpha_3$) зависит от выбранной цели, но в любом случае должно соблюдаться условие: $\alpha_3 > \alpha_2 > \alpha_1$.

Установка насадки, если угол ее раствора выбран правильно, позволяет дополнительно увеличить крутизну скатов главного лепестка и значительно

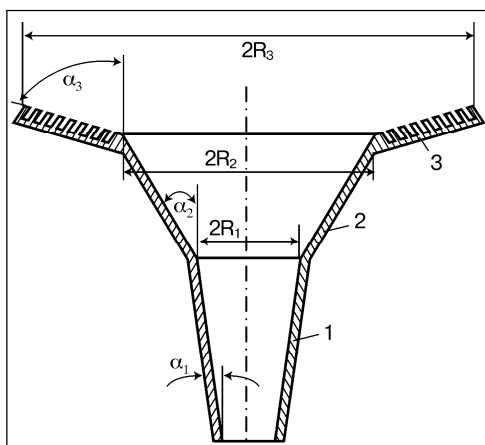


Рис. 1.31

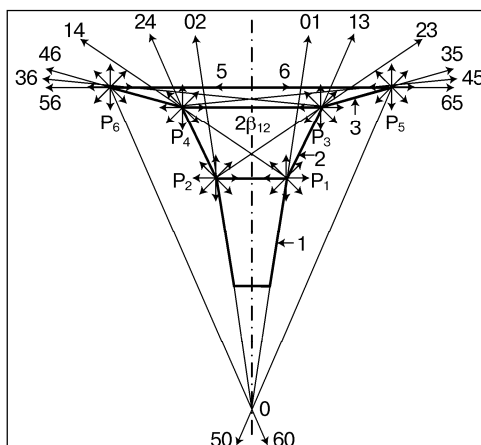


Рис. 1.32

уменьшить уровень бокового излучения в пл.Е, причем без ухудшения согласования. Это выгодно отличает РРИнк от РРИК, в котором канавки, расположенные непосредственно на стенках основного рупора, согласование ухудшают. Выбор оптимальной величины угла раствора насадки ($2\alpha_3$) в зависимости от поставленной цели можно пояснить, рассматривая секторы действия прямого излучения рупора и его дифракционных полей от точек дифракции $P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6$, рис. 1.32.

Прямое излучение малого рупора имеет наиболее высокий уровень, поэтому оно всегда и очень активно участвует в формировании главного лепестка. Если мы не хотим оказать сильного влияния на главный лепесток и, к тому же, значительно ухудшить согласование рупора с питающим трактом, то на пути прямого излучения не должно быть никаких препятствий.

Прямое излучение пирамидального рупора в пл.Е, если его рассматривать в виде лучей, выходящих из геометрической вершины рупора, ограничивается лучами 02 и 01, т. е. углом $2\alpha_1$ (сектор действия прямого излучения конического рупора, как будет показано в дальнейшем, несколько шире), поэтому: $\alpha_3 \gg \alpha_1$.

Дифракционные поля излома (точки P_1 и P_2) участвуют в формировании не только ближнего бокового излучения, но и главного лепестка, определяя крутизну его скатов. Сектор действия этих полей (вне рупора) с одной стороны ограничен лучами 24 и 13, скользящими вдоль стенок рупора 2. С другой стороны — лучами 14 и 23, падающими из точек P_1 и P_2 на противоположные кромки раскрыва рупора 2 и образующими угол $2\beta_{12}$. Для увеличения крутизны скатов главного лепестка и снижения уровня ближнего бокового излучения необходимо выполнить условие: $\alpha_2 < \alpha_3 \leq \beta_{12}$. При α_3 незначительно большем α_2 насадка может оказывать весьма существенное влияние как на ближнее боковое излучение рупора, так и на главный лепесток, не только увеличивая крутизну его скатов, но и сужая его в рабочем секторе углов, что не всегда желательно. Если $\alpha_2 = \beta_{12}$, то наблюдается очень сильное подавление поля в направлениях, определяемых граничными лучами 14 и 23, а также дифракционных полей от точек P_3 и P_4 .

Дифракционные поля от кромки раскрыва (точки P_3 и P_4) могут участвовать не только в формировании ближнего бокового излучения, но (в зависимости от величины угла $2\alpha_3$) и дальнего. Сектор действия этих полей (вне рупора и при $\alpha_3 > \beta_{12}$), с одной стороны, ограничен лучами 46 и 35, скользящими вдоль стенок насадки, а с другой — лучами 36 и 45, падающими из точек P_3 и P_4 на противоположные кромки насадки.

Дифракционные поля от кромки насадки (точки P_5 и P_6) в основном участвуют в формировании дальнего и заднего излучения, а при малых углах $2\alpha_3$ — и ближнего. Сектор действия полей от точек P_5 и P_6 (вне рупора) ограничен с одной стороны лучами 65 и 56, падающими из точек дифракции P_5 и P_6 на противоположные кромки насадки, а с другой — лучами 50 и 60, которые здесь (условно) проходят через геометрическую вершину малого рупора. Однако фактически сектор их действия ограничивается конструктивными элементами рупора и волноводного тракта.

Величина дифракционных полей от точек P_5 и P_6 в сильной степени зависит от уровня их облучения, а он, в свою очередь, зависит от угла раствора насадки 3 и уменьшается по мере его увеличения.

Выбор оптимального угла раствора насадки, в конечном итоге, зависит от поставленной цели и определяется исходя из сектора действия и величины вклада каждого из дифракционных полей. При этом следует учитывать, что наибольшее подавление наблюдается примерно в том направлении, в котором падающий луч скользит по импедансной поверхности, но вблизи этого направления может появиться ярко выраженный максимум.

На основе проведенных исследований для снижения уровня дальнего бокового излучения в переднем полупространстве можно рекомендовать: $\beta_{12} \leq \alpha_3 \leq 90^\circ$, а для снижения уровня бокового излучения в заднем полупространстве: $90^\circ \leq \alpha_3 \leq (\alpha_2 + 90^\circ)$, в общем случае: $\alpha_2 < \alpha_3 \leq (\alpha_2 + 90^\circ)$.

Уровень бокового излучения в заднем полупространстве определяется, в основном, дифракционным полем либо точки P_3 , либо точки P_4 (исключение составляет сектор вблизи направления 180° , где «работают» оба поля, но только в том случае, если они не затенены конструктивными элементами рупора и волноводного тракта). Поэтому для более глубокого подавления излучения в заднем полупространстве необходимо, чтобы кромка насадки не облучалась дифракционным полем от точки раскрыва основного рупора, расположенной и по другую сторону от его оси. Как показали экспериментальные исследования, делать насадку с углом раствора больше $\alpha_2 + 90^\circ$ нецелесообразно.

Рабочий диапазон РРИнк определяется как геометрическими размерами самого рупора, так и геометрическими размерами канавок, а также их конструкцией. За пределами действия канавок РРИнк со стороны нижних частот работает примерно так же, как и РРИ с гладкими стенками, а со стороны высоких канавки оказывают влияние на те волны, длина которых является примерно кратной нечетным значениям $\lambda/4$.

Экспериментальные ДН рупоров с разными насадками подтвердили правильность высказанных выше предположений.

На рис. 1.33 приведены ДН конического РРИнк, предназначенного для антенны типа АДЭ, измеренные на нижней частоте (7,9 ГГц) рабочего диапазона (7,9 — 8,4 ГГц) на расстоянии, соответствующем реальному (очень близкому) расположению рупора относительно малого зеркала.

На стадии разработки исследовались насадки с углами: $\alpha_3 = \alpha_2 = 22,5^\circ$, $\alpha_3 = \beta_{12} = 45^\circ$, $\alpha_3 = \alpha_2 + 45^\circ = 67,5^\circ$, $\alpha_3 = 90^\circ$, причем насадки с $\alpha_3 = \alpha_2 = 22,5^\circ$ и $\alpha_3 = \alpha_2 + 45^\circ = 67,5^\circ$ были изготовлены в двух вариантах: с канавками и без них.

Суммарная расфазировка рупора без насадки $\Delta\varphi_\Sigma = \Delta\varphi_p + \Delta\varphi_{sp} = 1,5\pi$, где

собственная расфазировка

$\Delta\varphi_p = 0,52\pi$, а расфазировка из-за расстояния $\Delta\varphi_s = 0,99\pi$.

ДН рупора без насадки, где уровень бокового излучения наиболее высок, показана на рис. 1.33 штрихпунктирной линией.

Насадка с $\alpha_3 = 22,5^\circ$ (крестики), являющаяся продолжением стенок основного рупора, как и предполагалось, существенно снижает уровень бокового излучения, но при этом про-

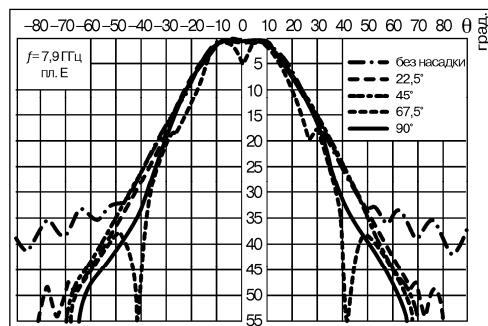


Рис. 1.33

исходит значительная деформация формы главного лепестка в пределах рабочего сектора углов.

Насадка с $\alpha_3 = \beta_{12} = 45^\circ$ (точки), когда краевой луч, дифрагированный на противоположном изломе, почти скользит вдоль стенки насадки, практически не влияя на главный лепесток в пределах рабочего сектора углов, сильно увеличивает крутизну скатов за его пределами. При этом уровень бокового излучения подавляется примерно в том же секторе углов, что и при насадке с $\alpha_3 = 22,5^\circ$, но, как и ожидалось, появляется ярко выраженный боковой лепесток, что в некоторых случаях весьма нежелательно.

Насадка с $\alpha_3 = 90^\circ$ (пунктир) существенных изменений в пределах всего главного лепестка не вносит, но уровень бокового излучения (он здесь не показан) подавляется в меньшей степени, чем при использовании предыдущих насадок.

Наилучший суммарный эффект, как следует из сравнения, достигается при использовании насадки, имеющей $\alpha_3 = \alpha_2 + 45^\circ = 67,5^\circ$ (сплошная линия), образующая которой лежит примерно посередине между граничными дифракционными лучами от точек излома, скользящими вдоль своей стенки, и падающими на противоположные.

На рис. 1.34. приведены ДН рупора с насадкой ($\alpha_3 = 67,5^\circ$), измеренные в пл. Е (сплошная линия) и пл. Н (пунктир) на трех частотах (средней и крайних) диапазона 7,9÷8,4 ГГц и на близком расстоянии, соответствующем расстоянию до вспомогательного зеркала той антенны, для которой данный облучатель разрабатывался.

С данной насадкой на всех трех частотах наблюдается симметрирование ДН до уровня $-(35 \div 40)$ дБ, да и на более низком уровне различие по поляризациям незначительно.

Кроме того, эта насадка не искажает форму главного лепестка в пределах рабочего сектора углов, а за его пределами крутизна скатов главного лепестка значительно увеличивается. При этом поле в пл. Е спадает без существенных осцилляций, как это характерно для плоскости Н. Подавление поля до уровня -55 дБ происходит в более широком секторе углов, чем со всеми другими насадками (на рис. 1.34 и следующих далее боковое излучение не показано).

На рис. 1.35 показаны ДН в пл. Е рупора без насадки (штрих-пунктир) и рупора с насадками ($\alpha_3 = 60^\circ$), имеющими разное количество канавок (1, 4 и 8 — штриховая, точечная и непрерывная линия, соответственно), измеренные на частоте 7,9 ГГц.

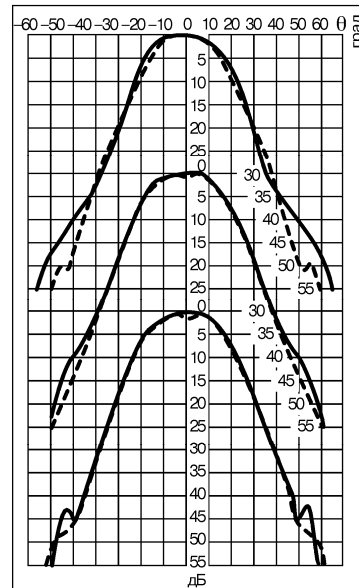


Рис. 1.34

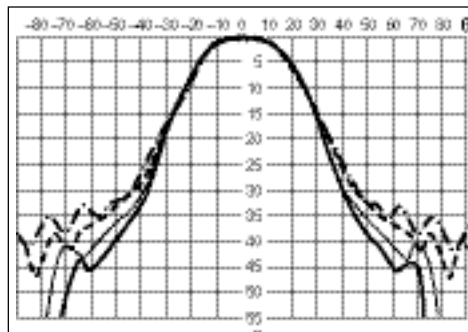


Рис. 1.35

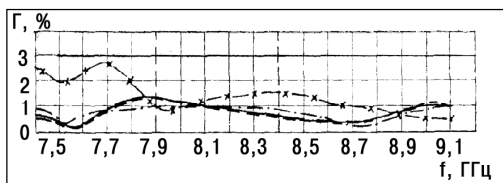


Рис. 1.36

на входе рупоров, имеющих разные насадки, показан на рис. 1.36.

Рупор без насадки — сплошная линия; рупор с насадкой ($\alpha_3 = 67,5^\circ$) без канавок — штриховая. Тот же рупор с насадками, имеющими четвертьволновые канавки: насадка с углом $\alpha_3 = 67,5^\circ$ — штрих-пунктир; насадка с углом $\alpha_3 = 22,5^\circ$ — штриховая линия с крестиками.

Заметное влияние на согласование рупора оказывает только насадка с канавками, имеющая $\alpha_3 = \alpha_2 = 22,5^\circ$, т.е. являющаяся продолжением стенок основного рупора.

Предложенный выше подход к выбору угла раствора насадки справедлив не только для РРИ с гладкими стенками, но и для рупоров (без излома и с изломом, синфазных и расфазированных), внутренние стенки которых имеют канавки. При этом минимально допустимый угол раствора насадки для РК выбирается исходя из ширины главного лепестка.

В зависимости от поставленной цели возможно использование насадки не с одним изломом, а с несколькими, каждая секция которой может оказывать наиболее сильное влияние на определенный сектор углов. Если воздействие на

Сравнение показывает, что при таком угле даже одна канавка оказывает на уровень бокового излучения заметное влияние, а с увеличением количества канавок их воздействие на ДН увеличивается.

Коэффициент отражения ($\Gamma, \%$) в диапазоне $7,4 \div 9,1$ ГГц, измеренный

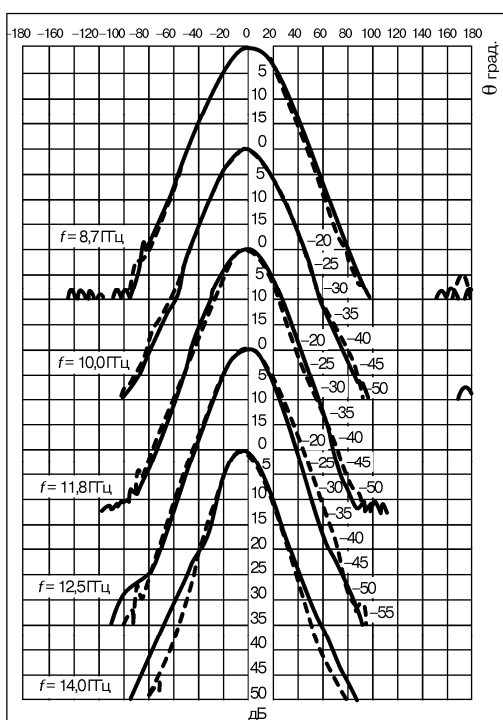


Рис. 1.37

главный лепесток в пределах рабочего сектора углов нежелательно, то угол раствора насадки должен быть не меньше ширины главного лепестка по уровню $-(10 \div 15)$ дБ.

Преимущества РРИнк (по сравнению с РРИ), определяемые насадкой с канавками: увеличение глубины осевой симметрии главного лепестка и/или уменьшение уровня бокового излучения в заданном секторе углов, но только в диапазоне действия канавок.

Плата: усложнение (по сравнению с РРИ) конструкции рупора, увеличение требований к точности изготовления, возможное (незначительное) ухудшение согласования с питающим трактом, ограничения по мощности.

РК, снабженные насадкой с канавками (РКнк), могут дать еще более глубокое симметрирование главного лепестка, чем РК без насадки.

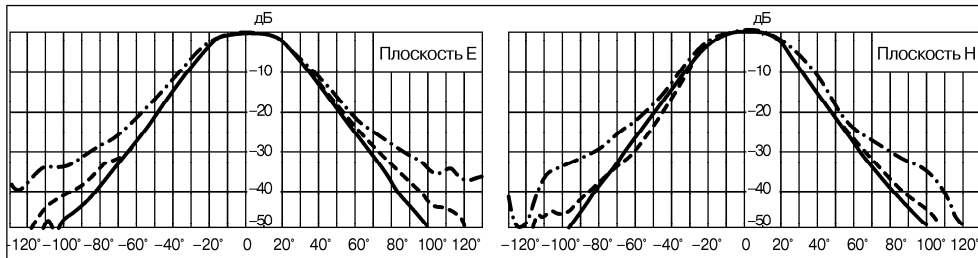


Рис. 1.38

Экспериментальные ДН (рис. 1.37, сплошная линия — пл. Е, пунктир — пл. Н) РК, снабженного насадкой с канавками — РКнк, отличаются глубоким уровнем симметрирования, вплоть до $-(45 \div 50)$ дБ почти во всем исследованном диапазоне (8,7 ÷ 14,0 ГГц), крайние частоты которого отличаются в 1,6 раза.

В пределах диапазона 8,7 ÷ 14,0 ГГц суммарная расфазировка исходного (гладкого) рупора, без учета влияния канавок, $\Delta\varphi_{\Sigma} \approx \Delta\varphi_p \approx 1,2 \div 1,9\pi$ (измерения проводились в дальней зоне).

Канавки в этом рупоре (глубиной, равной примерно четверти длины самой длинной волны рабочего диапазона) нарезаны на внутренних стенках, начиная от волноводного входа. При увеличении числа насадок (или числа изломов насадок) увеличивается глубина симметрирования, сглаживаются осцилляции и уменьшается уровень дальнего бокового излучения.

На рис. 1.38 показаны ДН предыдущего рупора, измеренные на частоте 8,76 ГГц при отсутствии насадок (штрих-пунктир), при наличии одной насадки с $\alpha_3 = 44,5^\circ$ (штриховая линия) и двух насадок с $\alpha_3 = 44,5^\circ$ и $\alpha_4 = 79^\circ$ (сплошная линия).

Согласование рупора с внутренними канавками, если не приняты специальные меры, о которых было сказано ранее, естественно, хуже, чем рупора с гладкими стенками, но когда оно решающей роли не играет, а основное требование предъявляется к уровню боковых лепестков, то выбор может быть остановлен именно на таком рупоре.

Преимущества РКнк (по сравнению с РК): дополнительное увеличение глубины осевой симметрии главного лепестка, дополнительное уменьшение уровня бокового излучения, но только в диапазоне действия канавок.

Плата: дополнительное усложнение конструкции.

РРИ с криволинейной насадкой с канавками (РРИкнк), рис. 1.39, [52] значительно сложнее в изготовлении, но более эффективен.

Нижняя часть РРИкнк (см. рис. 1.39) — это РРИ с гладкими стенками, состоящий из малого, синфазного, рупора (1) с диаметром раскрытия $2R_1$ и углом раствора $2\alpha_1$ и основного, расфазированного, рупора (2) с диаметром раскрытия $2R_2$ и углом раствора $2\alpha_2$.

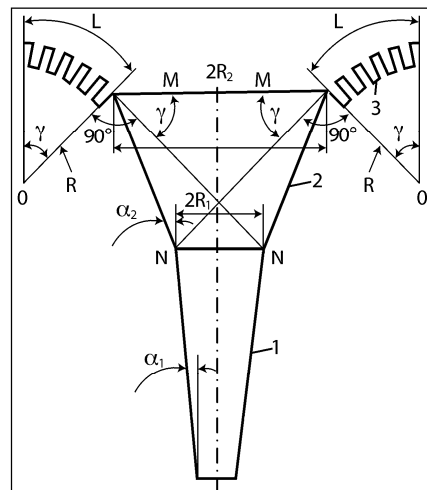


Рис. 1.39

Образующая криволинейной насадки (3) представляет собой часть окружности длиной L и радиусом R , являющимся перпендикуляром, восстановленным из точки соприкосновения насадки с кромкой рупора (точка M) к линии, проходящей под углом γ к плоскости раскрыва рупора с насадкой, причем:

$$L = (t_k + t_B) n^\circ, R = L 180^\circ / \pi \gamma,$$

где t_k — ширина канавки, t_B — ширина выступа, n — число канавок ($15 \geq n \geq 3$), $\gamma = \arctg\{(R_2 - R_1) / [(R_2 - R_1) \operatorname{tg} \alpha_1]\}$.

Выполнение образующей насадки в форме такой окружности позволяет в широком секторе углов воздействовать на дифракционные поля от точек M и M' , возбуждаемые лучами, дифрагированными в точках N и N' и падающими в направлении линий NM' и $N'M$.

При использовании насадок с прямолинейной образующей, которые были рассмотрены выше, наиболее глубокое подавление бокового излучения достигается в сравнительно узком секторе углов, когда направление распространения падающей дифракционной волны совпадает с направлением образующей насадки. При этом, как уже было сказано, энергия может сложиться в фазе в других направлениях, увеличив в этих направлениях уровень бокового излучения.

При наличии криволинейной насадки дифракционное поле не имеет четко выраженной угловой ориентации и как бы «размазывается» в широком секторе углов. Поэтому его общий уровень значительно ниже, чем при использовании насадки с прямолинейной образующей.

На рис. 1.40 показаны для сравнения экспериментальные ДН в пл. E трех видов рупоров с одинаковым углом раствора: РРИ (без насадки), РРИнк (с насадкой, имеющей канавки и прямолинейную образующую) и РРИкнк (с насадкой, имеющей канавки и криволинейную образующую).

Насадка с криволинейной образующей не только уменьшает уровень бокового излучения в наиболее широком секторе углов (практически везде за пределами главного лепестка), но и полностью устраняет осцилляции на скате главного лепестка, присущие двум другим типам рупоров. При этом сохраняются все основные достоинства РРИ, включая хорошее естественное согласование, а также форму и ширину главного лепестка в пределах рабочего сектора углов, но, исключая, естественно ширину рабочего диапазона, так как дополнительное улучшение ДН наблюдается только в диапазоне действия канавок.

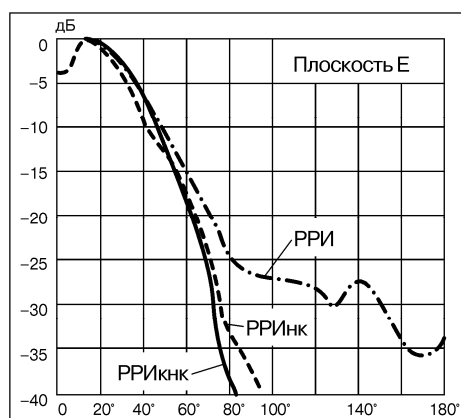


Рис. 1.40

Хорошее согласование объясняется тем, что большая часть канавок расположена не только вне зоны первичного поля рупора, но и вне зоны наиболее сильных дифракционных полей — полей от точек N и N' . Поэтому величина сигнала, отраженного от канавок обратно в рупор, мала. Воздействие насадки на поля, формирующие главный лепесток, минимально потому, что угол между касательной к образующей насадки и осью рупора равен или больше угла, образованного осью рупора и линиями NM' и $N'M$, т. е. насадка практически не воздействует на поля, формирующие

главный лепесток. Однако, если необходимо увеличить влияние на главный лепесток (и требования по согласованию это позволяют), то можно изменить сопряжение криволинейной образующей насадки со стенкой основного рупора. Например, сделать ее сопряженной с линиями NM и $(N'M')$ или к линиям, проходящим между NM и $N'M$ (NM' и $N'M'$).

Аналогичным образом может быть выполнена криволинейная насадка не только для конических РРИ, но и пирамидальных, а также для обычных синфазных и расфазированных рупоров. Но тогда ее конструкция выбирается, исходя из принципа работы соответствующих рупоров и поставленной задачи.

Преимущества РРИнкк (по сравнению с РРИнк): увеличение (в диапазоне действия канавок) глубины осевой симметрии главного лепестка при уменьшении амплитудных и фазовых осцилляций, равномерное дополнительное уменьшение уровня бокового излучения в широком секторе углов без ухудшения согласования.

Плата: дополнительное, причем значительное, усложнение конструкции.

Основные преимущества, общие для всех видов рупоров с канавками: улучшение осевой симметрии и уменьшение уровня бокового излучения, но только в диапазоне действия канавок.

Основная плата, общая для всех видов рупоров с канавками: усложнение конструкции, увеличение требований к точности изготовления, ограничение пропускаемой мощности, возможное ухудшение согласования с питающим трактом.

1.4.4. Рупоры с диэлектриком (РД)

Рупоры с диэлектриком (РД) (синфазные и расфазированные), как правило, конструктивно и технологически проще РК, но имеют по сравнению с ними другой весьма существенный недостаток — тепловые потери, так как влияние на ДН осуществляется за счет диэлектрика, внесенного внутрь рупора и/или установленного в его раскрыве.

При помощи слоя диэлектрика с малыми тепловыми потерями определенной толщины, нанесенного на стенки рупора можно сформировать импедансную структуру, работающую аналогично четвертьволновым канавкам. Требуемое амплитудно-фазовое распределение можно сформировать и при помощи диэлектрической втулки определенной конфигурации, вставленной внутрь рупора. При этом синфазный рупор можно сделать расфазированным, а расфазированный — синфазным, что дает возможность существенно варьировать продольным размером рупора при одинаковой ширине его главного лепестка. Кроме того, можно сформировать в РР осесимметричную ДН с заданной формой вершины главного лепестка, присущую РРИ.

Методика расчета диэлектрической втулки [23], позволяющей создать синфазное распределение амплитуды поля в произвольном сечении рупора, основана на лучевом представлении поля внутри рупора. Зачастую можно ограничиться учетом влияния на фазовое распределение только дифракционных полей, создаваемых лучами, дифрагированными в месте сочленения волноводной и рупорной части, рис. 1.41.

В этом случае фазовое распределение в произвольном сечении, проходящем через точки P_3P_4 , определяется дифракционными лучами, выходящими из

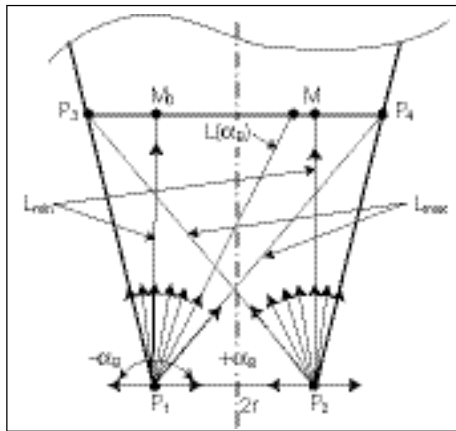


Рис. 1.41

точек P_1 и P_2 , которые при расчете втулки выбраны за начало координат. Так как система симметрична, то рассмотрим лишь лучи, выходящие из точки P_1 .

Фаза $\varphi(\alpha_B)$ в произвольной точке M сечения P_3P_4 равна:

$$\varphi(\alpha_B) = \beta (L(\alpha_B) - L_{\min}),$$

где $\beta = 2\pi/\lambda$ — волновое число; $L(\alpha_B)$ — расстояние от P_1 до произвольной точки M ; L_{\min} — расстояние от точки P_1 до ближайшей от нее точки сечения M_0 ; α_B — текущая угловая координата.

Если поместить на пути дифракционных лучей диэлектрик, толщина которого L_D является функцией угла α_B , то электри-

ческая длина пути до произвольной точки M равна:

$$L'(\alpha_B) = L(\alpha_B) - L_D(\alpha_B) (\epsilon^{1/2} - 1),$$

где $L'(\alpha_B)$ — электрическая длина пути до точки M ; L_D — толщина диэлектрика в направлении α_B ; ϵ — диэлектрическая проницаемость.

При создании в сечении P_3P_4 синфазного распределения при минимальных габаритах внесенного диэлектрика $L'(\alpha_B) = L_{\max}$, где L_{\max} — расстояние до наиболее удаленной точки сечения, в данном случае до точки P_4 . В этом случае конфигурация втулки в секторе углов, ограниченном лучами P_1P_3 и P_1P_4 рассчитывается по формуле:

$$L_D(\alpha_B) = [L_{\max} - L(\alpha_B)] / (\epsilon^{1/2} - 1). \quad (1.18)$$

Аналогичный результат получается и для точки P_2 .

Для превращения расфазированного рупора в синфазный сечение P_3P_4 совмещается с раскрывом рупора. Если же требуется в обычном РР синтезировать ДН аналогичные ДН РРИ (осесимметричные и с заданной формой вершины главного лепестка), то сечение P_3P_4 следует совместить с сечением соответствующим излому РРИ.

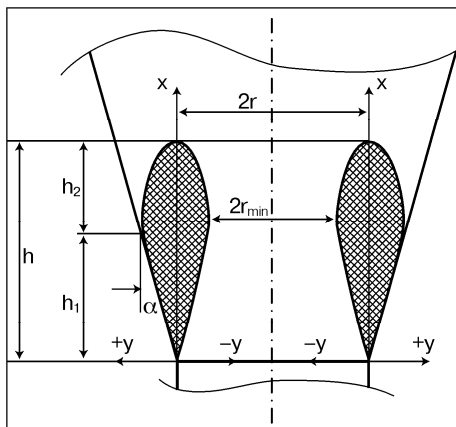


Рис. 1.42

Влияние диэлектрической втулки распространяется не только на фазовое распределение, но и на амплитудное, но во многих практических случаях им можно пренебречь.

Диэлектрическая втулка, рис 1.42, рассчитанная по (1.18), представляет собой заполненное диэлектриком торoidalное тело вращения некоторой замкнутой поверхности, сечение которого на рис. 1.42 заштриховано.

Ось вращения замкнутой поверхности смещена относительно оси рупора на расстояние r , равное радиусу волновода. Материал втулки должен иметь малые

тепловые потери. Диэлектрическая проницаемость материала выбирается таким образом, чтобы размеры втулки не превышали допустимых пределов.

Каждая сторона втулки должна влиять лишь на лучи, исходящие из прилегающей к ней точки. Поэтому она не должна выходить на другую сторону оси, а в области точек P_2 и P_1 должна ограничиваться лучами P_1P_4 и P_2P_3 , соответственно (см. рис. 1.41). Кроме того, при больших значениях ϵ , диаметр отверстия втулки ($2r_{\min}$) должен быть больше критического размера волновода для самой длинной волны рабочего диапазона.

Один из исследованных вариантов втулки (см. рис. 1.42) h общей высотой состоит из двух частей. Верхняя часть втулки (высотой h_2) и ее нижняя часть со стороны оси рупора рассчитывается по (1.18), а прилегающая к стенкам рупора нижняя часть (высотой h_1), имеет коническую форму с углом α , равным половине угла раствора рупора.

Экспериментальные ДН синфазного РД и базового полурасфазированного рупора ($2R = 140$ мм, $2\alpha = 30^\circ$, $2r = 30$ мм), измеренные в дальней зоне на частотах: 10 ГГц, 11 ГГц и 12 ГГц, показаны на рис. 1.43, 1.44 и 1.45, соответственно.

Слева даны ДН рупора без втулки, а справа — с фторопластовой втулкой ($\epsilon = 2,2$), профиль которой показан на рис. 1.42.

ДН рупора с втулкой по своей форме приближаются к ДН обычного синфазного рупора, имеющего равный размер раскрыва, но большую длину. Но в отличие от него главный лепесток РД на обеих поляризациях имеет практически одинаковую ширину, что связано с влиянием втулки не только на фазовое, но и на амплитудное распределение, которое при расчете втулки не учитывалось.

Коэффициент усиления рупора с втулкой соответствует усилению синфазного рупора, имеющего тот же размер раскрыва, а без втулки — на $1,5 \div 2$ дБ меньше. Эти потери усиления полностью соответствуют (см. рис. 1.4) фазовым искажениям в его раскрыве, составляющим в исследованном диапазоне $108 \div 133$ градуса.

Экспериментальные ДН расфазированного РД, имеющего осесимметричную ДН с заданной формой вершины, и базового РР показаны на рис. 1.46.

Слева приведены ДН обычного РР (без втулки), а справа

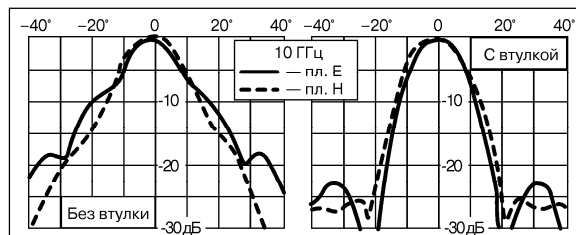


Рис. 1.43

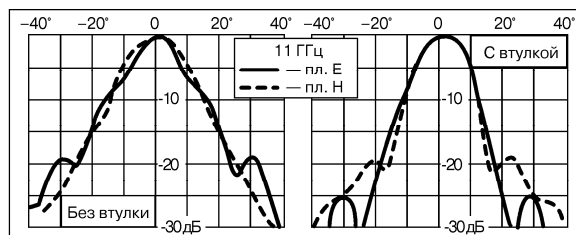


Рис. 1.44

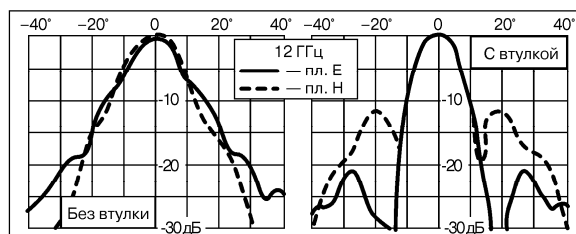


Рис. 1.45

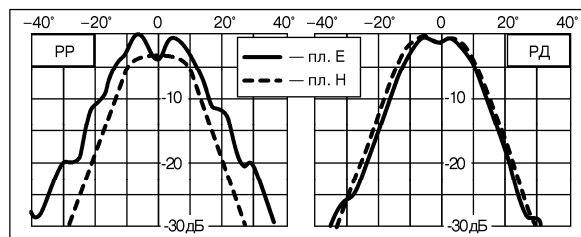


Рис. 1.46

— ДН РД (с фторопластовой втулкой, $\epsilon = 2,2$). Эта тороидообразная втулка была рассчитана аналогично предыдущей. Но в этом случае синфазное распределение амплитуды поля было создано на сечении, равном сечению излома оптимизированного РРИ.

ДН расфазированного РД на обеих поляризациях полностью идентичны ДН соответствующего оптимизированного РРИ, хотя в данной схеме малый синфазный рупор заменен втулкой, которая позволила получить одинаковые с РРИ ДН при значительно меньшем продольном размере рупора, равном размеру основного рупора, используемого в схеме РРИ.

Геометрические размеры РД, имеющего заданную ширину и форму главного лепестка определяются по той же методике и тем же формулам и графикам, что и РРИ (см. раздел 1.4.2), но при этом размер $2R_1$ должен соответствовать не сечению излома, а сечению РР, на котором необходимо при помощи втулки создать синфазное распределение.

Диэлектрическая втулка с упрощенным профилем также позволяет получить желаемый эффект, так как для его достижения совсем необязательно синтезировать требуемое фазовое распределение с очень большой точностью. Оно может и отклоняться от него (осциллировать), но величина осцилляций не должна превышать допустимой величины ($\sim 45^\circ$).

В этом случае профиль втулки может значительно отличаться от расчетного, но, выбрав ту или иную более простую форму втулки, являющуюся аппроксимацией расчетной, необходимо просчитать полученное при ее помощи фактическое фазовое распределение.

Результаты, аналогичные предыдущим (см. рис. 1.46), были получены с помощью втулки из пенистого полистирола, выполненной в виде цилиндра, в котором вырезано два конуса с вершинами, расположенными навстречу друг другу, рис. 1.47. Такая втулка является (в некотором роде) аппроксимацией тороидообразной и позволяет значительно упростить ее конструкцию и технологию изготовления. Можно использовать втулки и других форм.

Если форма втулки выбирается в соответствии с рис. 1.47, то для ее изготовления необходимо использовать материал со значительно меньшим ϵ , чем в первом варианте, так как в противном случае могут сильно увеличиться отражения внутри волновода, потому что отверстие волновода перекрыто втулкой.

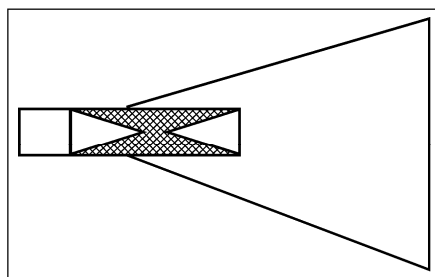


Рис. 1.47

При малых значениях ϵ такая втулка может немного выходить и за пределы лучей, ограничивающих ее размеры, о которых говорилось ранее, без заметного ухудшения ее влияния на ДН.

Область применения метода расчета диэлектрических втулок, исходя из лучевого представления поля в рупоре, не ограничивается рассмотренными вариантами диэлектрических втулок, позволяю-

ших создать синфазное распределение в заданном сечении рупора. Этот метод можно использовать и в том случае, когда требуется не уменьшить, а увеличить расфазировку рупора или создать в его раскрые (или заданном сечении) какое-либо специальное фазовое распределение. Данный метод, рассмотренный здесь применительно к коническим рупорам, может быть распространен и на пирамидальные рупоры.

При помощи втулки можно воздействовать не только на дифракционные поля, но и на прямое излучение рупора. По этому же методу можно рассчитать конфигурацию внутренней (и внешней) границы диэлектрика, заполняющего внутренний объем рупора, чтобы сделать его влияние позитивным (см. главу 3). Более точный расчет должен учитывать воздействие диэлектрика не только на фазовое распределение, но и на амплитудное.

Преимущества РД (по сравнению с обычными рупорами и с РРИ), обеспечиваемые за счет применения диэлектрика: влияние на направленные свойства без изменения размеров базового рупора.

Это позволяет изменить определенным образом ДН уже существующих рупорных облучателей и/или синтезировать требуемую ДН с заданной шириной главного лепестка при меньшей длине рупора, если на нее имеется ограничение, а также получить ДН, аналогичные РРИ, при значительно меньших продольных размерах.

Плата: усложнение конструкции, появление тепловых потерь, ограничения по мощности, ухудшение согласования с питающим трактом, уменьшение (по сравнению с РРИ) полосы частот, в которой сохраняются оптимальные ДН.

1.4.5. Рупоры с поглотителем (РП)

Из разных источников известно, что уменьшение уровня бокового излучения рупорных антенн при помощи поглощающего материала, нанесенного на стенки рупора или на фланец, расположенный перпендикулярно к его оси, не является оптимальным.

В первом случае, наряду с уменьшением уровня бокового излучения, наблюдается уменьшение коэффициента усиления, а иногда и изменение формы главного лепестка, что не всегда допустимо. Во втором случае сектор подавления бокового излучения ограничивается только задним полупространством.

Использование же в РП поглощающих насадок с оптимальным углом раствора [36], [32], [29], который для разных рупоров различен, позволяет уменьшить уровень бокового излучения в широком секторе углов при сохранении усиления и формы главного лепестка ДН.

Оптимизированный РП (конический или пирамидальный, синфазный или расфазированный) отличается от базового рупора тем, что к кромке его раскрыва пристыкована насадка с оптимальным углом раствора, на стенки которой нанесен поглотитель, рис. 1.48.

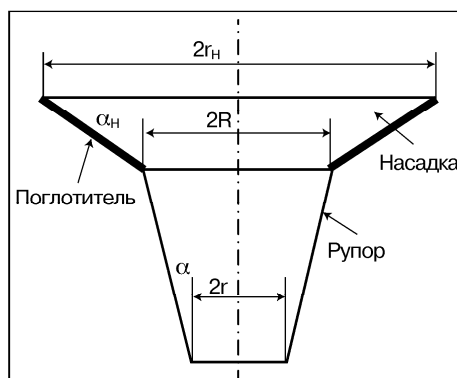


Рис. 1.48

Обозначение основных геометрических размеров конического РП (см. рис. 1.48): $2R_H$ и $2\alpha_H$ — размер раскрыва и угол раствора насадки, соответственно; $2R$ и 2α — размер раскрыва и угол раствора базового рупора, соответственно; $2r$ — диаметр волновода.

Оптимальный угол раствора насадки рупоров с осесимметричным главным лепестком и ярко выраженными минимумами между главным и первыми боковыми лепестками в общем случае должен быть примерно равен ширине главного лепестка по нулям базового рупора без насадки:

$$2\alpha_H = 2\theta_0,$$

где $2\theta_0$ — ширина главного лепестка по нулям базового рупора, которая может быть найдена либо расчетным путем, либо экспериментально.

Оптимальный угол раствора насадки синфазных РП (или других рупоров с разной на разных поляризациях шириной главного лепестка) выбирается исходя из заданного режима его работы.

При работе рупора на одной поляризации $2\alpha_H$ должен быть разным и соответствовать $2\theta_0$ каждой из плоскостей:

$$2\alpha_{HE} = 2\theta_{0E}, \text{ — для пл.Е, } 2\alpha_{HN} = 2\theta_{0H} \text{ — для пл.Н.}$$

При работе рупора на двух поляризациях угол раствора насадки $2\alpha_H$ может быть равным среднему значению: $2\alpha_H = (2\alpha_{HE} + 2\alpha_{HN})/2$ или специально выбранному значению, но в пределах: $2\alpha_{HE} \leq 2\alpha_H \leq 2\alpha_{HN}$.

С уменьшением $2\alpha_H$ увеличивается не только подавление уровня бокового излучения, но и влияние насадки на главный лепесток, что может привести к дополнительным тепловым потерям. С увеличением $2\alpha_H$ влияние насадки на главный лепесток уменьшается (или исключается), но уменьшается и сектор подавления бокового излучения. Поэтому следует выбирать компромиссный вариант.

Ширина главного лепестка обычных синфазных рупоров может быть определена по (1.3)÷(1.6).

Для обычного конического рупора, который почти всегда работает на двух поляризациях: $2\theta_{0E} = 2\arcsin(1,22/2R\lambda)$ — в пл. Е, $2\theta_{0H} = 2\arcsin(2R)$ — в пл. Н, где λ — длина волны, $2R$ — диаметр раскрыва конического рупора.

Для обычного пирамидального рупора: $2\theta_{0E} = \lambda/2\alpha_E$ — в пл. Е, $2\theta_{0H} = 3\lambda/2\alpha_H$ — в пл. Н, где $2\alpha_E$ и $2\alpha_H$ — размер раскрыва пирамидального рупора в пл. Е и пл. Н, соответственно.

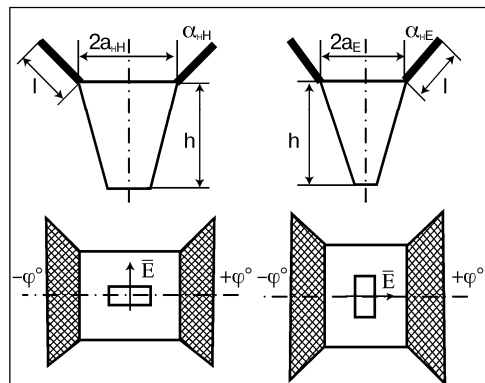


Рис. 1.49

Схема синфазного пирамидально-го РП с прямоугольным волноводом показана на рис 1.49.

РП, предназначенный для независимой работы на двух поляризациях, должен иметь квадратное сечение волноводного выхода.

Поглощающая насадка пирамидального РП может быть расположена в одной или в обеих плоскостях. Она может иметь в разных плоскостях одинаковую или разную высоту, а также одинаковый или разный угол наклона

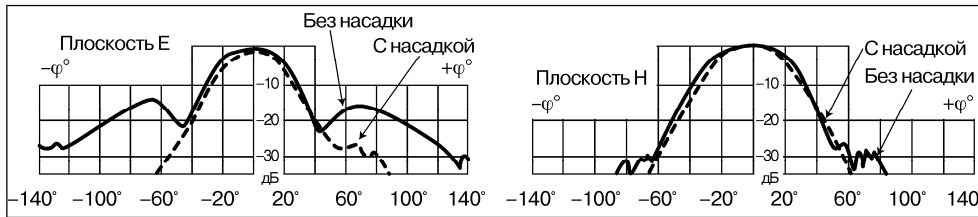


Рис. 1.50

относительно оси. Все зависит от назначения РП и предъявляемых к нему требований.

Диаграммы направленности синфазного пирамидального РП на волне 26,8 мм, измеренные в дальней зоне, приведены на рис. 1.50.

Размеры рупора: $2\alpha_H = 1,8\lambda$, $2\alpha_E = 1,4\lambda$, $h = 1,1\lambda$, $\alpha_{HH} = 48^\circ$, $\alpha_{HE} = 41^\circ$, $l = 2,5\lambda$.

Поглощающая насадка с углом раствора, найденным по изложенной выше методике, значительно уменьшает уровень бокового излучения, особенно в пл.Е, практически не влияя на главный лепесток. Заметного уменьшения коэффициента усиления при этом не наблюдалось.

Оптимальный угол раствора насадки РРП (РР с поглощающей насадкой), ширина главного лепестка которых по нулям четко не выражена, определяется исходя из того, что главный лепесток таких рупоров формируется, в основном, не размером апертуры, а углом его раствора.

Ширина главного лепестка расфазированного рупора в пл. Н примерно равна углу его раствора, а в пл. Е (при расфазировке $1,5 \div 2,0 \pi$ и более) — углу раствора соответствует уровень, равный примерно $-(10 \div 15)$ дБ.

В общем случае для РРП необходимо соблюдать следующее условие:

$2\alpha_H > 2\alpha$, где $2\alpha_H$ — угол раствора насадки, 2α — угол раствора рупора.

Оптимальный угол раствора насадки РРИП (РРИ с поглощающей насадкой), как и насадки РРИнк, выбирается исходя из того, что в формировании главного лепестка этого рупора участвуют и лучи, дифрагированные на изломе (см. рис. 1.32), а за пределами их действия начинается зона бокового излучения. Поэтому оптимальный угол раствора насадки этого рупора можно ограничить с двух сторон: $2\beta_{12} \geq 2\alpha_H > 2\alpha_2$, где β_{12} — угол, образованный осью рупора и прямой, соединяющей противоположные от оси точки раскрытия рупора и сечения излома, $\beta_{12} = \arctg [R_2 \tg \alpha_2 / (R_2 - R_1)]$.

Для полного исключения влияния поглотителя на главный лепесток ДН (и на коэффициент усиления) $2\alpha_H$ можно сделать несколько больше $2\beta_{12}$.

Размеры базового рупора (РРИ): $2R_1 = 1,6\lambda$, $2\alpha_1 = 14^\circ$, $2R_2 = 4,6\lambda$, $2\alpha_2 = 70^\circ$, $2\beta_{12} = 110^\circ$. Размеры насадок: $2\alpha_H = 2\alpha_2 = 70^\circ$ и $2\alpha_H = 120^\circ$ с одинаковым размером $2R_H = 7,3\lambda$.

Диаграммы направленности РРИ (без насадки) и РРИП (с поглощающими насадками), имеющими разные углы раствора, приведены на рис 1.52.

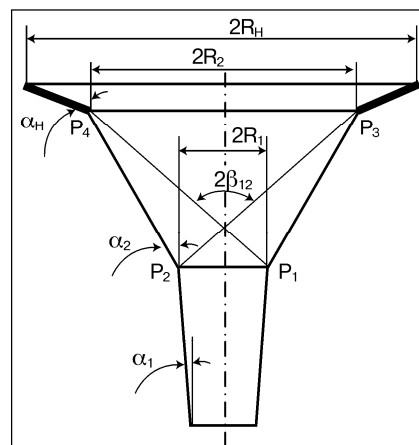


Рис. 1.51

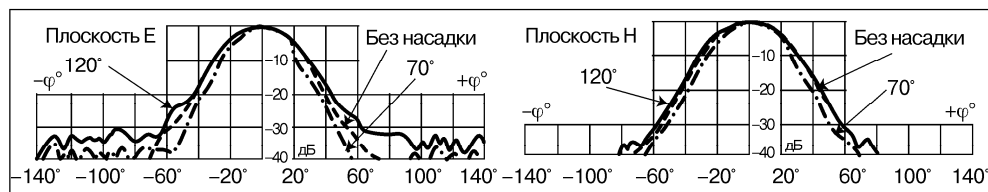


Рис. 1.52

При $2\alpha_H = 2\alpha_2 = 70^\circ$ (штрих-пунктир), как и ожидалось, наблюдается весьма значительное влияние на главный лепесток даже в пл. Н. При $2\alpha_H = 120^\circ$, несколько большем угла $2\beta_{12} = 110^\circ$ (пунктир), ширина и форма главного лепестка практически не меняется, а подавление уровня бокового излучения во всем, которое в круговом секторе углов здесь не показано, весьма глубокое.

Поглощающие насадки для рупоров, уже имеющих низкий уровень боковых лепестков (например, для рупоров с импедансными структурами), позволяют дополнительно подавить уровень бокового излучения. В этих случаях угол раствора насадки, как и во всех рассмотренных выше рупорах, должен примерно соответствовать ширине главного лепестка по нулям (или по уровню ниже -20 дБ) рупора без насадки.

Двускатная поглощающая насадка может быть использована в тех случаях, когда необходимо уменьшить уровень бокового излучения только в одной плоскости, где уровень боковых лепестков наиболее высок или где требуется обеспечить повышенную помехозащищенность.

На рис 1.53 (слева) показан рупор с двускатной поглощающей насадкой (она имеет черный цвет), а в центре и справа приведены ДН этого рупора, измеренные в плоскости, проходящей соответственно через короткие и длинные образующие насадки при разном расположении вектора Е.

Использование такой насадки в одной из АВО [29] позволило снизить уровень заднего излучения антенны на ~5 дБ в пл. Е и на ~3 дБ в Н. Но для получения требуемого положительного эффекта необходимо обеспечить плотное (без зазоров) прилегание поглощающего материала к стенкам рупора, причем с «нахлестом».

При двускатной насадке крышка, закрывающая раскрыв рупора, также получается двускатной, что (при соответствующем расположении рупора) дополнительно уменьшает вероятность скопления на ней осадков.

Общие преимущества оптимизированных РП (по сравнению с неоптимизированными РП), обусловленные оптимальными углами раствора поглощающих насадок: уменьшение уровня бокового излучения в широком секторе углов без влияния на главный лепесток и без уменьшения коэффициента усиления.

Плата (по сравнению с неоптимизированными РП): фактически «бесплатно».

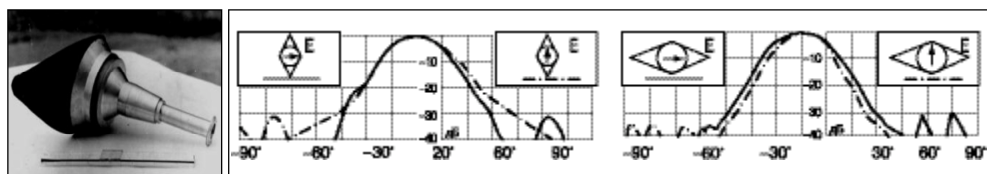


Рис. 1.53

1.4.6. Многолучевой и многоступенчатый РРИ

Многолучевой РРИ, позволяющий сформировать многолучевую ДН, может быть изготовлен на базе почти любой модификации РРИ. Для этого в затененной области основного рупора располагаются раскрывы дополнительных синфазных рупоров, число которых определяется их целевым назначением и возможностью расположения в данной (теневой) зоне.

На рис. 1.54 показан пятирупорный вариант конического РРИ [7]. Он состоит из малого синфазного рупора (1) и расфазированного рупора (2), в теневой зоне которого (выше излома 3) расположены 4-е синфазных рупора (4).

Рупоры 4 присоединены к рупору 2 таким образом, что их раскрывы образованы пересечением поверхностей этих рупоров. Расстояние осей рупоров 4 от оси рупора 2 определяется необходимым поворотом их главных лепестков относительно оси основного рупора и возможностью расположения раскрывов этих рупоров в пределах теневой области. Оси дополнительных рупоров могут быть как параллельны оси основного рупора, так и наклонены относительно нее на некоторый угол, что приведет к дополнительному повороту направления их главного излучения.

При использовании данного рупора в качестве облучателя зеркальной антенны рупор 2 является основным облучателем и обеспечивает практически столь же высокие параметры, как и обычный РРИ, так как установка дополнительных рупоров не приводит к заметным изменениям его направленных свойств и согласования с питающим трактом, потому что они находятся в теневой зоне. Кроме того, исходные ДН дополнительных рупоров также несколько улучшаются за счет влияния на них стенок основного рупора. Заметим, что при таком расположении развязка между основным и дополнительными рупорами мала и составляет более 20 дБ.

Дополнительные рупоры могут служить для формирования многолучевой или воронкообразной ДН, используемой для пеленгации или других целей.

Многоступенчатый РРИ, рис. 1.55, состоит из нескольких последовательно расположенных секций (в данном случае из трех: 1, 2 и 3) с уменьшающимся (скачками) углом раствора. Рупор в целом представляет собой несколько РРИ (в данном случае два: РРИ₁₋₂ и РРИ₂₋₃), каждая секция которых (кроме крайних) выполняет одновременно роль малого (синфазного) рупора и основного (расфазированного), имеющих оптимальные размеры. При этом каждый очередной излом является раскрывом малого рупора для предыдущего (большего) излома, выступающего для него в качестве раскрыва основного рупора, если две соседние секции рассматривать как оптимальный РРИ (см. раздел 1.4.1).

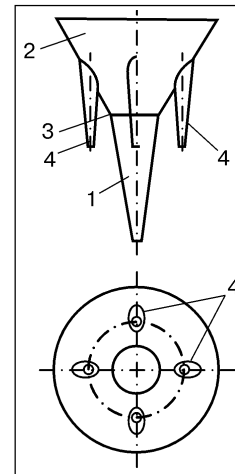


Рис. 1.54

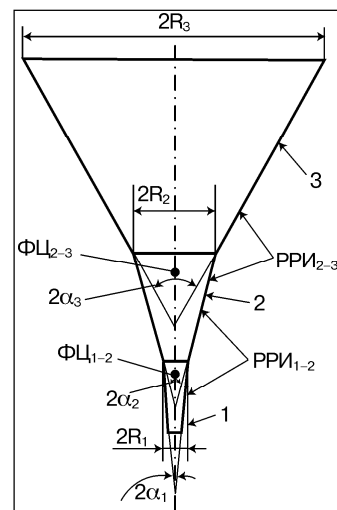


Рис. 1.55

$2R_1(2\alpha_1)$ и $2R_2(2\alpha_2)$ являются для РРИ₁₋₂ диаметром раскрыва (углом раствора) малого и основного рупора соответственно, а для РРИ₂₋₃ ими будут: $2R_2(2\alpha_2)$ и $2R_3(2\alpha_3)$.

Многоступенчатый рупор имеет оптимальные ДН в нескольких (в данном случае — в двух) разнесенных между собой диапазонах частот (оптимальные частоты двух соседних РРИ могут отличаться в 3 — 4 раза).

Ширина главного лепестка ДН каждого РРИ, определяемая углом раствора рупора, выступающего для него в качестве основного, уменьшается по мере уменьшения этого угла ($2\alpha_1 < 2\alpha_2 < 2\alpha_3$). При оптимальных размерах рупора углы раствора соседних секций отличаются примерно в два раза, поэтому примерно в два раза отличается и ширина главного лепестка соседних РРИ. Из-за большой разности углов каждая секция с большим углом раствора на главный лепесток РРИ с меньшим углом раствора основного рупора влияния не оказывает, а лишь уменьшает уровень его бокового излучения. Фазовые центры (ФЦ₁₋₂ и ФЦ₂₋₃) разнесены вдоль оси на значительные расстояния. Это дает возможность сконцентрировать в каждом из них энергию соответствующего им рабочего диапазона. Расчет геометрических размеров каждого многоступенчатого РРИ осуществляется по методике, изложенной в разделе 1.4.2, а оптимальная длина волны определяется, исходя из обеспечения расфазировки, необходимой для реализации главного лепестка с заданной формой вершины.

Область применения многоступенчатого РРИ пока не определена. Не рассмотрен и вопрос ввода-вывода энергии каждого из диапазонов волн, хотя возможность расположения соответствующих устройств в теневой области каждого из РРИ может оказаться весьма перспективной, так как в этом случае они (как и дополнительные рупоры в рассмотренном выше многорупорном облучателе) не должны оказывать особого влияния.

1.5. Облучатели для антенн с разным в главных плоскостях размером апертуры

1.5.1. Постановка задачи и возможные способы ее решения

Для двухполяризационных антенн с разным во взаимно перпендикулярных плоскостях размером апертуры необходимы облучатели, имеющие одинаковую на обеих поляризациях, но разную во взаимно-перпендикулярных плоскостях ширину главного лепестка. К таким облучателям относятся: конический рупор с эллиптическим и пирамидальный рупор с прямоугольным раскрывом, снабженные импедансной структурой, например, в виде канавок или диэлектрика. Но конструкция и технология изготовления этих рупоров (особенно конического) весьма сложна. Кроме того, эти рупоры, как и другие рупоры с канавками, имеют ограничение по мощности.

Значительно более простыми по конструкции и технологии изготовления являются конические и пирамидальные РРИ с гладкими стенками, имеющие разные углы раствора во взаимно-перпендикулярных плоскостях и эллиптический или прямоугольный раскрыв, соответственно. Проведенные исследования показали возможность синтезировать у таких РРИ диаграмму направленности с главным лепестком, одинаковым на двух поляризациях, но разным во взаимно перпендикулярных плоскостях, что достигается только за счет правильного выбора геометрических размеров рупора.

1.5.2. РРИ с эллиптическим раскрывом (РРИэр)

РРИэр, рис. 1.56, как и другие РРИ, состоит, рис. 1.57, из малого синфазного рупора 1 и основного расфазированного рупора 2. Но основной рупор имеет эллиптический раскрыв и существенно разные в плоскостях AA' и BB' углы раствора ($2\alpha_2' \neq 2\alpha_2''$). При этом малый рупор может быть выполнен в виде эллиптического или кругового конуса.

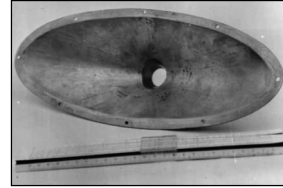


Рис. 1.56

РРИэр по своим свойствам аналогичен коническому РРИ с круглым раскрывом, но ширина его главного лепестка отличается по плоскостям в соответствие с разными углами раствора основного рупора.

Основные геометрические размеры РРИэр с заданной шириной и формой главного лепестка определяются в зависимости от углов $2\alpha_2'$ и $2\alpha_2''$ по методике, изложенной в разделе (1.4.2), отдельно для плоскости AA' и BB'.

Размер малой полуоси эллиптического раскрыва РРИэр — R_2' определяется в зависимости от угла α_2' , соответствующего плоскости AA' ($\alpha_2' < \alpha_2''$).

При заданном значении расфазировки, соответствующей выбранной для этой плоскости форме вершины главного лепестка и крутизне его скатов, R_2' рассчитывается, как и радиус раскрыва обычного РРИ, по (1.8) или (1.9) или определяется по графикам, приведенным на рис 1.12 ÷ 1.15 с учетом того, что $R_2 = R_2'$, $\alpha_2 = \alpha_2'$.

Размер большой полуоси эллиптического раскрыва РРИэр — R_2'' определяется в зависимости от угла α_2'' и уже найденного значения размера малой полуоси по следующей формуле: $R_2'' = R_2' \tan \alpha_2'' / \tan \alpha_2'$.

Размеры полуосей сечения излома РРИэр определяются по (1.10) или (1.15) или по графикам рис. 1.16, исходя из того, что при расчете R_1' : $R_2 = R_2'$, $\alpha_2 = \alpha_2'$, а при расчете R_1'' : $R_2 = R_2''$, $\alpha_2 = \alpha_2''$.

Углы раствора малого рупора $2\alpha_1'$ и $2\alpha_1''$ определяются в зависимости от R_1' и R_1'' из условия (1.16), полагая (в случае эллиптического малого конуса), что при расчете α_1' : $R_1 = R_1'$, а при расчете α_1'' : $R_2 = R_2''$ (при использовании кругового конуса выбирается меньшее значение α_1).

Фазовый центр РРИэр (как и РРИ) расположен примерно между сечением излома и вершиной основного рупора (1.17). Но так как сечение излома этого рупора в каждой из плоскостей находится на разном расстоянии от раскрыва, то следует принять усредненную величину.

Расфазировка основного рупора при определении R_2'' по (1.7) отличается по плоскостям. Поэтому будет отличаться и крутизна скатов главного лепестка, и форма его вершины. Если $\alpha_2' < \alpha_2''$, то в пл. BB' крутизна скатов главного лепестка больше, а вершина — более изрезанная, чем в пл. AA'. Чтобы получить в любой

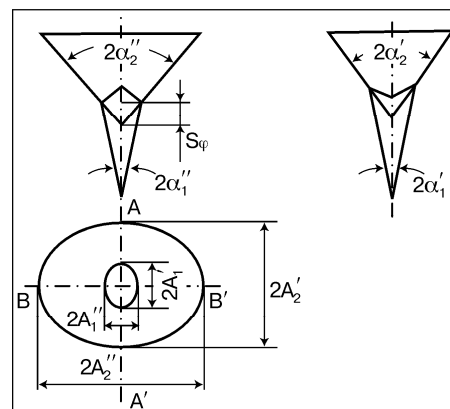


Рис. 1.57

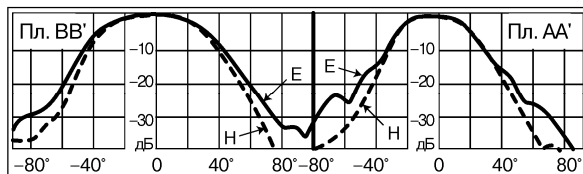


Рис. 1.58

плоскости, проходящей через ось рупора, главный лепесток идентичной формы, необходимо обеспечить равную расфазировку основного рупора во всех плоскостях. Это достигается изменением длины его образующей.

При равной расфазировке ($n = \text{const}$) длина образующей основного рупора рассчитывается по формуле: $L_2^i = R_2^i / \sin \alpha_2^i$, где L_2^i , α_2^i , R_2^i — соответственно длина образующей, половина угла раствора и радиус раскрытия рупора в плоскости, проходящей через ось рупора под углом φ_i относительно плоскости AA' , где угол раствора основного рупора равен $2\alpha_2'$.

В этом случае сечение рупора в пл. BB' получается двускатным. Это дает возможность закрыть раскрыв такого рупора, как и рупора с двускатной поглощающей насадкой (см. рис. 1.53), двускатной крышкой, представляющей собой две плоскости, расположенные под углом друг к другу и проходящие через точки, соответствующие равной расфазировке в двух взаимно перпендикулярных плоскостях.

Диаграммы направленности РПИэр ($2R_2' = 6\lambda$, $2R_2'' = 8,1\lambda$, $2R_1' = 1,6\lambda$, $2R_1'' = 1,2\lambda$, $2\alpha_2' = 70^\circ$, $2\alpha_2'' = 100^\circ$) в плоскостях AA' и BB' , измеренные в дальней зоне, показаны на рис. 1.58.

Сравнение показывает, что на обеих поляризациях (Е и Н) ДН в пределах главного лепестка достаточно хорошо совпадают до уровня $-(10 \div 12)$ дБ, а их ширина по уровню -10 дБ отличается примерно в 1,4. раза, т. е. в соответствии с отношением $\alpha_2''/\alpha_2' \approx 1,4$.

Преимущества (по сравнению с РПИ), обусловленные разными в разных плоскостях углами раствора: разная в разных плоскостях ширина главного лепестка при сохранении его одинаковой ширины на обеих поляризациях.

Плата: некоторое усложнение конструкции по сравнению с РПИ, но значительно меньшее, чем рупоров с импедансными структурами, позволяющими получить аналогичный эффект.

1.5.3. РПИ с прямоугольным раскрывом (РПИпр)

РПИпр, как и пирамидальный РПИ с квадратным раскрывом, состоит из малого, синфазного, и основного, расфазированного, рупора, но основной рупор имеет не квадратный, а прямоугольный раскрыв и разные в двух взаимно перпендикулярных плоскостях углы раствора. По своим свойствам РПИпр аналогичен РПИэр.

Основные геометрические размеры РПИпр, рис. 1.59, при заданной ширине и форме главного лепестка можно приблизительно определить по аналогии с РПИэр, заменив R_2' , R_2'' , R_1' , R_1'' на d_2' , d_2'' , d_1' , d_1'' , соответственно. При этом лучшие результаты, как и для обычного пирамидального РПИ, получаются, если величину d_1' и d_1'' уменьшить в $1,2 \div 1,3$ раза.

Для получения в обеих плоскостях РПИпр равной расфазировки размер раскрытия рупора в пл. BB' при $\alpha_2' < \alpha_2''$ определяется из условия, что n равно величине, заданной при определении d_2' . В этом случае стенки рупора в пло-

скости AA' выступают относительно стенок BB' . Однако сечение рупора в пл. BB' (и его крышку) можно сделать двускатным, как и для РРИэр.

Диаграммы направленности

РРИпр, имеющего в главных плоскостях не только разные углы раствора, но и разный размер раскрыва ($2d_2' = 8,5\lambda$, $2d_2'' = 6,1\lambda$, $2d_1' = 1,8\lambda$, $2d_1'' = 1,4\lambda$, $2\alpha_2' = 50^\circ$, $2\alpha_2'' = 70^\circ$), измеренные в дальней зоне, показаны на рис. 1.60. Размер раскрыва в плоскостях AA' и BB' этого рупора был выбран, исходя из создания примерно равной расфазировки в обеих плоскостях. Полученное соотношение ширины главного лепестка по уровню $-(10 \div 12)$ дБ здесь также примерно равно отношению α_2''/α_2' .

Преимущества и плата за них для РРИпр те же, что и для РРИэр.

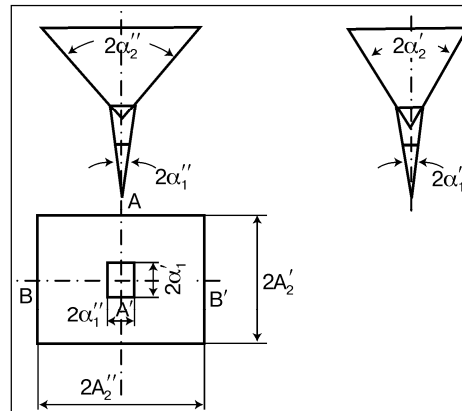


Рис. 1.59

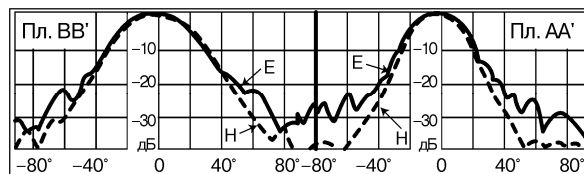


Рис. 1.60

1.6. Облучатели для антенн с вынесенным облучателем (АВО)

1.6.1. Требования, предъявляемые к облучателям АВО

Неосесимметричные антенны с вынесенным облучателем (АВО и РПА), имеют весьма специфическую особенность — их основное зеркало является лишь частью осесимметричного параболоида. При этом фокус параболоида (и находящийся в нем облучатель) расположен либо за пределами раскрыва зеркала, либо на его периферии, т. е. вынесен из центра раскрыва, рис. 1.61. Поэтому их обычно и называют антеннами с вынесенным облучателем.

Классическая схема однозеркальной АВО с круглым раскрывом (см. рис. 1.61) представляет собой вырезку из параболоида вращения цилиндром диаметром D . Ось этого цилиндра параллельна фокальной оси (OZ) исходного параболоида с фокусом O' и смещена относительно нее на некоторое расстояние (x_0), а ближняя к фокальной оси кромка зеркала удалена от нее на расстояние x_1 , причем $-x_0 < x_1 < x_0$ (при $x_1 = x_0$ диаметр цилиндра, т. е. раскрыв зеркала АВО, вырождается в 0, а при $x_1 = -x_0$ АВО вырождается в осесимметричную антенну).

Данная антенна имеет всего лишь одну плоскость симметрии (XOZ), которую по аналогии с РПА будем назы-

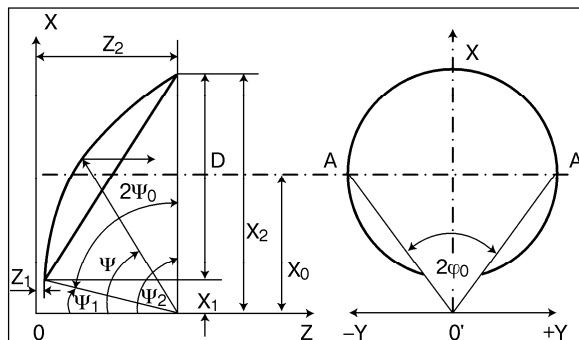


Рис. 1.61

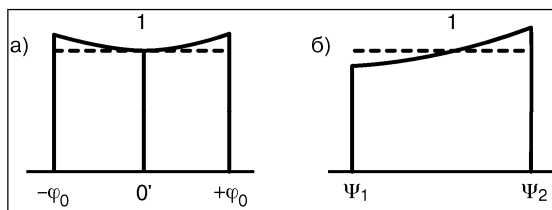


Рис. 1.62

вать продольной плоскостью. Плоскость, проходящую через точки $O'AA'$ («поперек» плоскости симметрии), — поперечной плоскостью антенны. Плоскость, проходящую через точки AA' параллельно фокальной оси, — поперечной плоскостью раскрыва. Если из текста ясно, об антен-

не или раскрыве идет речь, то уточнения может и не быть. Такое обозначение плоскостей распространим и на неосесимметричные облучатели, предназначенные для антенн этого типа. Угол раствора АВО в продольной плоскости $2\psi_2 = \psi_2 - \psi_1$, а в поперечной плоскости антенны — $2\varphi_0$.

Основная трудность при разработке АВО (и РПА) заключается в создании осесимметричного и (при необходимости) равномерного распределения амплитуды поля в раскрыве неосесимметричного зеркала.

При использовании в АВО облучателя с осесимметричным главным лепестком осесимметричное распределение в ее раскрыве может быть достигнуто только с помощью одного или нескольких зеркал со специальным профилем поверхности, что может существенно усложнить разработку и производство таких антенн. Некоторого выравнивания амплитудного распределения в продольной плоскости однозеркальной АВО, облучатель которой имеет осесимметричный главный лепесток, достигают путем поворота оптической оси облучателя в сторону его дальней кромки. При этом, однако, увеличивается переизлучение и уровень бокового излучения в направлении этой кромки, а выигрыш по КИП получается незначительным.

Наиболее радикальным способом увеличения эффективности однозеркальных АВО при сохранении (или даже уменьшении) уровня бокового излучения является использование облучателей со специальной (оптимальной) формой главного лепестка, рис. 1.62, о которой уже упоминалось.

Оптимальная ДН облучателя АВО (при прочих равных требованиях, предъявляемых к оптимальной ДН любого облучателя) должна иметь симметричный (см. рис. 1.62а) главный лепесток в поперечной плоскости и асимметричными (см. рис. 1.62б) — в продольной (в плоскости симметрии). При этом перепад уровня сигнала определяется разностью расстояний от центра зеркала до его кромок в соответствующих плоскостях.

Асимметричную форму главного лепестка имеют синфазные рупоры с косым срезом раскрыва, которые могут быть выполнены с гладкими стенками и с импедансной внутренней поверхностью [37], а также РРИ с гладкими стенками и косым срезом раскрыва [16] и/или с поворотом оси основного рупора относительно оси волновода и/или малого рупора [35].

1.6.2. Синфазные рупоры с асимметричным главным лепестком

В синфазном рупоре (и волноводе) асимметричная форма главного лепестка ДН достигается за счет косого среза раскрыва — сечения рупора (волновода) плоскостью, наклоненной под некоторым углом к его первоначальному раскрыву [37], рис. 1.63.

Рупор синфазный с косым срезом — РСкс (с гладкими стенками) имеет одну плоскость симметрии. Эта плоскость проходит через ось рупора и линию

ВВ', соединяющую ближнюю и дальнюю точки среза, ее по аналогии с антенной (см. рис. 1.63) назовем продольной плоскостью, а перпендикулярную к ней плоскость, проходящую через ось рупора и линию АА', соединяющую симметричные точки кромки рупора, — поперечной.

Данный рупор характеризуется (см. рис. 1.63) размером раскрыва ($2R$), углом раствора (2α) и углом среза (β_c).

Диаграммы направленности

РСкс в поперечной (АА') и продольной (ВВ') плоскости синфазного рупора, имеющего разные углы: $\beta_c = 10^\circ$, $\beta_c = 30^\circ$, $\beta_c = 50^\circ$, даны на рис. 1.64÷1.66.

Изменение угла β_c позволяет получить в продольной плоскости (ВВ') разный поворот и степень асимметрии главного лепестка, которые с увеличением β_c увеличиваются.

Достоинства РСкс (по сравнению с обычным РС), определяемые косым срезом: асимметричный главный лепесток; улучшение согласования с питающим трактом.

Плата: некоторое усложнение изготовления, разная на разных поляризациях зависимость поворота главного лепестка от угла среза.

Разную зависимость поворота главного лепестка от поляризации можно устранить путем импедансной структуры, выполнив ее, например, в виде канавок.

Рупор синфазный с косым срезом и канавками

— РСкс-к, в котором при помощи четвертьволновых канавок удалось выровнять ширину главного лепестка и сблизить угол его поворота на обеих поляризациях, показан на рис. 1.67.

Размеры рупора: $2R = 51$ мм, $\alpha = 5^\circ$, $\beta_c = 30^\circ$, ширина канавки — 3,5 мм, глубина — 6,5 мм, ширина выступа — 3 мм. Канавки, в принципе, могут быть разной формы и нарезаны

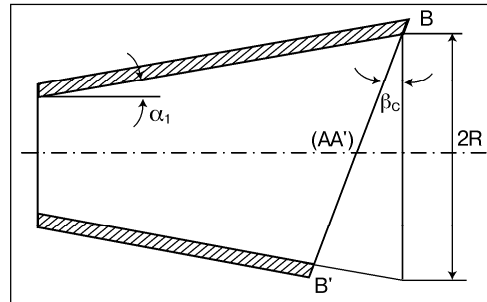


Рис. 1.63

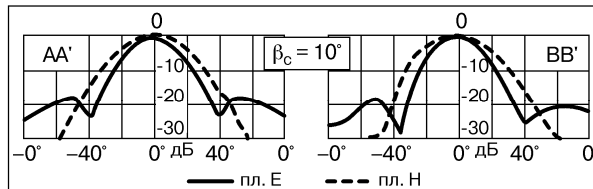


Рис. 1.64

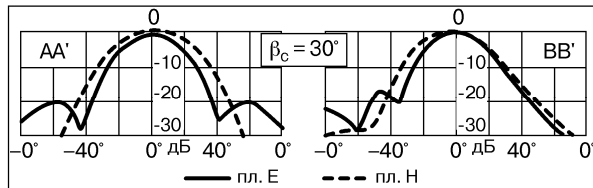


Рис. 1.65

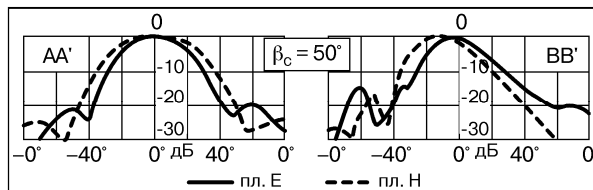


Рис. 1.66

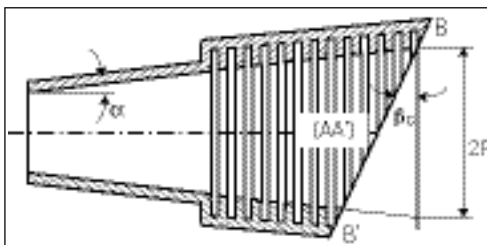


Рис. 1.67

не перпендикулярно оси рупора, а по спирали, что для рупора с косым срезом предпочтительнее.

Диаграммы направленности этого РСкс-к, измеренные на трех частотах (10,0; 11,2; 12,1 ГГц), отличающихся в $\sim 1,2$ раза показаны на рис. 1.68÷1.70, соответственно.

В поперечной плоскости (AA') ДН симметричны, а в продольной плоскости (BB') — асимметричны за счет косого среза, причем с равным для обеих поляризаций поворотом главного лепестка. Наличие канавок позволило (во всем исследованном диапазоне частот) синтезировать на обеих поляризациях главный лепесток почти одинаковой ширины и формы, а также существенно снизить уровень бокового излучения (он здесь не показан).

Определение геометрических размеров РСкс-к, имеющего заданную ширину главного лепестка в поперечной плоскости, где его ДН симметрична, осуществляется (при введении понятия эквивалентного раскрыва) так же, как при расчете РРИ с канавками (см. раздел 1.4.2 и 1.43).

Эквивалентный раскрыв в синфазном рупоре с равноглубокими канавками примерно соответствует сечению рупора в области первых двух (начиная от горла) канавок. Поэтому, задаваясь необходимой шириной главного лепестка в поперечной плоскости, можно определить размер рупора в этой плоскости на сечении, соответствующем второй канавке, а затем увеличить размеры рупора в зависимости от выбранного количества дополнительных канавок. В продольной плоскости размеры рупора зависят от выбранного угла среза β_c . А этот угол, в свою очередь, определяется, необходимой асимметрией главного лепестка, зависящей от геометрии зеркала, для которого рупор предназначается в качестве облучателя.

Преимущества РСкс-к, (по сравнению с РСкс), определяемые наличием

канавок: практически одинаковый на обеих поляризациях главный лепесток с равным для обеих поляризаций углом его поворота и снижение уровня бокового излучения.

Плата: ухудшение согласования с питающим трактом, дополнительное усложнение конструкции, увеличение требований к точности изготовления, увеличение габаритов при равной (с РСкс) ширине главного лепестка.

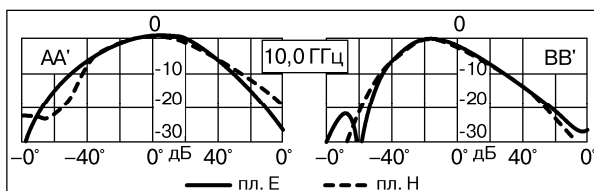


Рис. 1.68

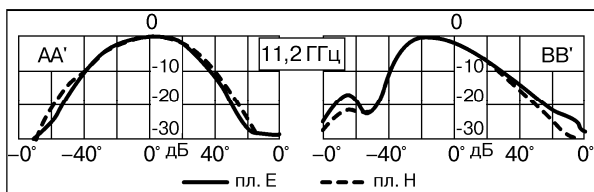


Рис. 1.69

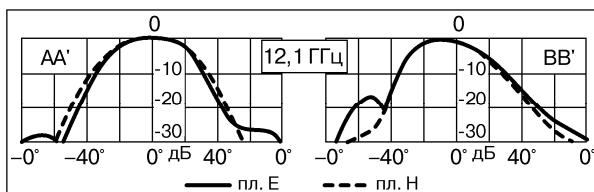


Рис. 1.70

1.6.3. Расфазированные рупоры с асимметричным главным лепестком

Рупор расфазированный с косым срезом — РРкс позволяет (при правильном подборе расфазировки) получить асимметричный главный

лепесток в одной из плоскостей. Однако РРкс выполненный на базе обычного РР имеет на разных поляризациях разную ширину главного лепестка и разный угол его поворота.

Для получения асимметричного главного лепестка одинакового на обеих поляризациях и с одинаковым углом поворота в качестве базового рупора следует использовать РРИ (см. раздел 1.4.1).

Асимметрия главного лепестка в этом рупоре может быть достигнута благодаря как косому срезу, рис. 1.71, так и повороту оси основного рупора относительно оси волновода и/или малого рупора, или же за счет совместного действия косого среза раскрыва и поворота оси.

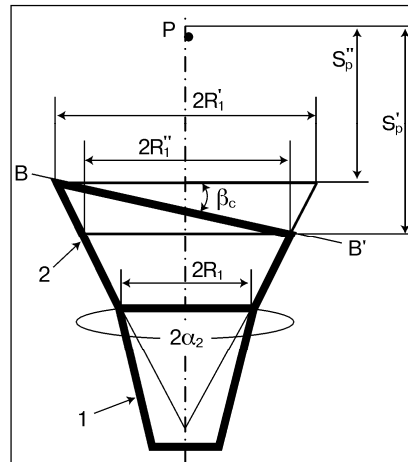


Рис. 1.71

Рупор расфазированный с изломом и косым срезом — РРИкс, как и другие рупоры этого типа, состоит (см. рис. 1.71) из малого синфазного рупора (1) с диаметром раскрыва $2R_1$ и основного расфазированного рупора (2) с диаметром раскрыва $2R_2'$, который срезан плоскостью BB' , наклоненной относительно базового раскрыва на угол β_c до сечения рупора, равного $2R_2''$.

Определение геометрических размеров РРИкс осуществляется по той же методике, что и обычного РРИ, исходя из выбранных значений $2\alpha_2$, $2R_2'$ и $2R_2''$ (см. раздел 1.4.2).

В этом случае $R_2 = R_2'$ выбирается (для заданного S_p') из условия получения расфазировки (см. раздел 1.4.2), кратной четному значению n , например, $n = n' = 2$, а $R_2 = R_2''$ кратной (при заданном S_p'') нечетному и меньшему значению n , например, $n = n'' = 1$. Значения n' и n'' могут быть и другими, например, 4,0 и 3,0, соответственно.

Соответствующий выбор расфазировок и величины угла среза позволяет получить в продольной плоскости асимметричный главный лепесток. В поперечной плоскости главный лепесток остается симметричным, а форма его вершины соответствует расфазировке, которую имеет РРИкс в данной плоскости.

При $n = n' = 2$ и $n = n'' = 1$ расфазировка в поперечной плоскости будет равна $\sim 1,5$, а форма вершины главного лепестка — плоской.

Диаграмма направленности

РРИкс в продольной плоскости, проходящей через ось рупора и линию BB' , соединяющую ближнюю и дальнюю точки кромки рупора, показана на рис. 1.72 (положительные значения углов соответствуют окрестности точки В).

Наличие косого среза и правильный выбор расфазировки позволяют

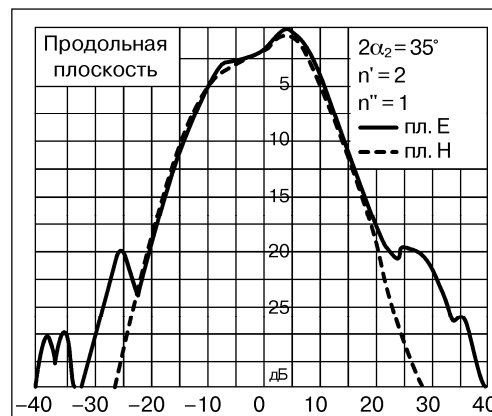


Рис. 1.72

получить «перекос» главного лепестка до $2\div 3$ дБ при одинаковой на обеих поляризациях ширине и форме главного лепестка.

Преимущества РРИкс, (по сравнению с РРИ) определяемые косым срезом: асимметрия главного лепестка, но в сравнительно узкой полосе частот, так как она определяется расфазировкой, которая зависит от частоты; улучшение согласования; увеличение крутизны ската крышки, закрывающей раскрыв облучателя.

Плата: незначительное усложнение конструкции.

Рупор расфазированный с изломом и поворотом оси — РРИпо, рис. 1.73, по принципу своего действия аналогичен РРИ и наследует все его основные достоинства.

Необходимая асимметрия главного лепестка, если в качестве основного используется симметричный рупор ($L_2' = L_2''$) (см. рис. 1.73) достигается только благодаря повороту оси расфазированного рупора 2 относительно оси синфазного рупора 1 на некоторый угол $\gamma_{по}$ (П 730237), величина которого определяется геометрией антенны. Геометрическая вершина рупора 2 смещена относительно оси рупора 1 (в пределах его внутреннего пространства) на некоторую величину Δ .

Ширина главного лепестка и коэффициент усиления такого рупора слева от оси рупора 1 определяется углом α_2' , а справа — углом α_2'' . Так как $\alpha_2' < \alpha_2''$, то в окрестностях угла α_2' ширина главного лепестка РРИпо меньше, а усиление больше, чем в окрестностях угла α_2'' , что и вызывает асимметрию главного лепестка.

Преимущества РРИпо (по сравнению с РРИ), определяемые поворотом оси: асимметрия главного лепестка, сохраняемая в широком диапазоне частот, так как она задается угловыми соотношениями; улучшение согласования с питающим трактом; увеличение крутизны ската крышки, закрывающей раскрыв облучателя.

Плата: некоторое усложнение конструкции.

При неизменной длине образующей основного рупора расфазировка в точках раскрыва, расположенных в разных плоскостях, проходящих через ось рупора, различна. Это приводит к заметной изрезанности вершины главного лепестка пространственной ДН, особенно в области, соответствующей углу α_2'' , где расфазировка максимальна. Этот недостаток можно устранить, введя в РРИпо и косой срез, рис. 1.74.

Рупор расфазированный с изломом, поворотом оси и косым срезом основного рупора — РРИпо-кс ($L_2' \neq L_2''$, см. рис. 1.74) позволяет (аналогично описанным выше рупорам с разными в разных плоскостях углами раствора, см. раздел 1.5.2) обеспечить для всех точек кромки основного рупора 2 постоянство разности фаз в любой из плоскостей, проходящих через ось рупора 1. Это достигается благодаря тому, что разность между длиной образую-

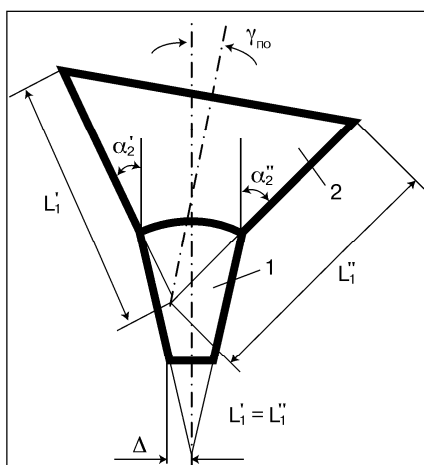


Рис. 1.73

щей L_2' основного рупора и ее проекцией H_2' на ось малого рупора (см. рис. 1.74) постоянна:

$L_2 - H_2 = L_2' - H_2' = L_2'(\theta) - H_2'(\theta) = \text{const}$, где θ — угол поворота плоскости наблюдения, проходящей в данном случае через ось рупора 1. При этом условии величина расфазировки для любой точки раскрыва основного рупора получается одинаковой, что позволяет уменьшить количество и глубину фазовых осцилляций в пределах главного лепестка.

На рис. 1.75 показана фотография РРИпо-кс (слева — вид сбоку, справа — со стороны раскрыва). В этом рупоре, как и в РРИпо, линия пересечения малого рупора с основным (линия излома) не лежит в одной плоскости и имеет форму сердца.

Преимущества РРРпо-кс (по сравнению с РРРпо), полученные за счет косо́го среза: увеличение асимметрии; уменьшение числа и глубины фазовых и амплитудных осцилляций главного лепестка; дополнительное улучшение согласования с питающим трактом; уменьшение габаритных размеров; дополнительное увеличение крутизны ската крышки, закрывающей раскрыв облучателя. Этот рупор практически суммировал преимущества РРИпо и РРИкс.

Плата: дополнительное (незначительное) усложнение конструкции.

Рупор расфазированный с изломом, поворотом оси и косым срезом основного и малого рупора — РРИпо-кс-кс имеет косой срез не только основного, но и малого рупора, рис. 1.76.

В описанных выше схемах РРИпо и РРИпо-кс (см. рис. 1.73 и 1.74) распределение амплитуды поля в сечении излома практически синфазно и симметрично, поэтому направление главного излучения малого рупора совпадает с его осью. Но если малый рупор 1 выполнен с косым срезом, то это позволяет дополнительно увеличить асимметрию главного лепестка. При этом сечение излома следует наклонить в сторону противоположную наклону оси основного рупора (см. рис. 1.76), потому что именно в эту сторону происходит (при косом срезе синфазного рупора) поворот направления его главного излучения, а также увеличивается крутизна скатов главного лепестка и более четко выражен первый минимум.

При больших значениях β_1 оптимальный угол поворота оси основного рупора ($\gamma_{\text{по}}$) следует опре-

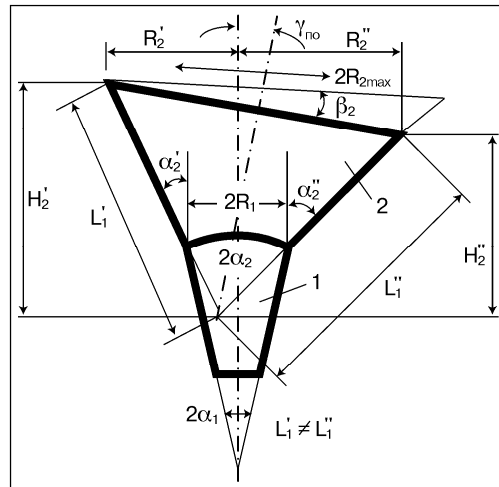


Рис. 1.74

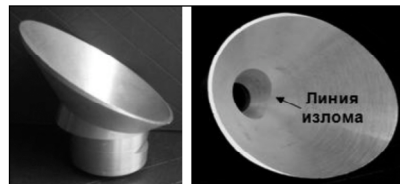


Рис. 1.75

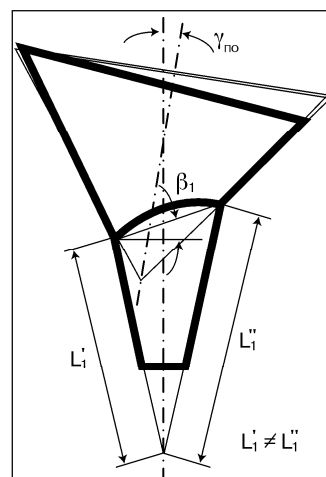


Рис. 1.76

делять, учитывая новое направление излучения и новую форму главного лепестка ДН малого рупора. Но при малых значениях β_1 , когда $\beta_1 = 10 \div 20^\circ$, его влияние на ДН можно не учитывать, так как оно скажется, в основном, только на согласовании рупора с питающим трактом, которое несколько улучшится благодаря расфазировке поля, отраженного от излома, так как $L_1' \neq L_1''$.

Преимущества РРИпо-кс-кс (по сравнению с РРИпо-кс), полученные за счет косого среза малого рупора: дополнительный поворот главного лепестка; дополнительное улучшение согласования с питающим трактом, что особенно важно, если к согласованию предъявляются повышенные требования.

Плата: дополнительное усложнение конструкции.

Определение оптимальных геометрических размеров РРИпо, РРИпо-кс и РРИпо-кс-кс в зависимости от требуемой ширины и формы главного лепестка ДН ничем, в принципе, не отличается от методики определения оптимальных размеров обычного РРИ (см. раздел 1.4.2).

Базовым параметром, как и при определении оптимальных размеров РРИ, является угол раствора основного рупора $2\alpha_2$, определяющий ширину главного лепестка по уровню $-(10 \div 12)$ дБ. Этот угол выбирается в зависимости от угла облучения кромок зеркала в поперечной плоскости антенны ($2\psi_0$) и продольной (см. рис. 1.61), которые для АВО с круглым раскрывом примерно равны, т.е. $2\alpha_2 = \psi_0 + \varphi_0$.

Если к антенне предъявляются повышенные требования по помехозащищенности, то $2\alpha_2$ выбирается несколько меньше $\psi_0 + \varphi_0$, а если по эффективности, то несколько больше, о чем уже было сказано применительно к обычным РРИ.

Соотношение углов α_2'/α_2'' РРИпо, обеспечивающее требуемый уровень перепада амплитуды поля между направлениями на верхнюю и нижнюю кромку (величину асимметрии главного лепестка в продольной плоскости) приближенно может быть найдено из условия:

$\operatorname{tg} \alpha_2' < \operatorname{tg} \alpha_2'' = S_H/S_B$, где S_H и S_B — расстояние от фокуса антенны до нижней (ближней) и верхней (дальней) кромки зеркала, соответственно, когда $\alpha_2' + \alpha_2'' = 2\alpha_2$.

Размеры РРИпо, имеющего $L_2' = L_2''$, задаются углом раствора рупора ($2\alpha_2$) и размером раскрыва основного рупора ($2R_2$), выбираемым исходя из необходимой расфазировки рупора (требуемой формы вершины главного лепестка) в продольной плоскости в области угла α_2' (в направлении дальней кромки зеркала).

С точки зрения эффективности, если это возможно исходя из максимально допустимых геометрических размеров рупора, желательно выбрать в этом направлении расфазировку кратную четным значениям n ($n = 2; 4 \dots$), соответствующим воронкообразной форме главного лепестка, или кратной нечетным значениям $0,5n$ ($n = 1,5; 2,5 \dots$), соответствующим плоской форме вершины.

Размер раскрыва $2R_2$ в этом случае определяется по (1.8) или (1.9), либо по графикам рис. 1.12 ÷ 1.15, исходя из выбранного значения n для расстояния S_p , равного расстоянию от центра раскрыва рупора до дальней кромки зеркала при $\alpha_2 = \alpha_2'$. По аналогии с обычным РРИ определяется и размер сечения излома, и угол раствора малого рупора.

Размеры РРИпо-кс, имеющего $L_2' \neq L_2''$, задаются углом раствора ($2\alpha_2$) и исходным размером раскрыва основного рупора ($2R_{2\max}$), который определяется

так же, как и при равной длине образующих. Но длина образующей в каждой из плоскостей, проходящих через ось основного рупора, рассчитывается исходя из выбранной суммарной расфазировки, определяемой углом раствора рупора α_2^i в рассматриваемой плоскости и расстоянием до соответствующих точек зеркала, которое наиболее отличается в направлении дальней и ближней его кромки.

Например, при $\alpha_2^i = \alpha_2'$ и $\alpha_2^i = \alpha_2''$ радиусы раскрыва рупора, соответствующие (при данных углах) заданной общей суммарной расфазировке (собственной рупора и из-за расстояния, см. раздел 1.4.2) соответственно равны: $2R_2^i(\alpha_2') = 2R_2'$ и $2R_2^i(\alpha_2'') = 2R_2''$, $L_2' = R_2'/\sin\alpha_2'$ и $L_2'' = R_2''/\sin\alpha_2''$, (см. рис. 1.74). Аналогичным образом рассчитываются образующие и в других плоскостях. Но можно ограничиться расчетом лишь самой длинной — L_2' и самой короткой — L_2'' образующей, а плоскость среза совместить с их концами. Тогда секущая плоскость составит с исходным раскрывом ($2R_{2\max}$) угол β_2 во всех точках. Расчет, конструкция и изготовление такого рупора значительно упрощаются. Упрощается и защита рупора от атмосферных осадков, потому что для его укрытия можно использовать плоскую односкатную крышку.

Выбор расфазировки в направлении дальней и ближней кромки зеркала определяется необходимой степенью оптимизации главного лепестка. Для уменьшения изрезанности вершины главного лепестка расфазировка в направлении дальней кромки зеркала выбирается больше, чем в направлении ближней кромки и больше, чем в поперечной.

Во многих случаях оптимальным вариантом (при минимизации размеров рупора) является выбор примерно следующих значений n : $n = 2$ — в направлении дальней кромки зеркала, $n = 1,5$ — в направлении кромок в поперечной плоскости, $n = 1$ — в направлении ближней кромки. Если можно использовать рупор больших размеров, то допустимы и следующие значения n : $n = 4$ — в направлении дальней кромки, $n = 2$ — в поперечной плоскости и $n = 1$ в направлении ближней кромки.

Размеры РРИ-по-кс-кс рассчитываются аналогично РРИпо и РРИпо-кс, но не относительно оси малого рупора, а относительно направления его главного излучения. Однако при небольших углах среза ($\beta_1 = 10 \div 20^\circ$) отклонение направления главного излучения малого рупора от его оси весьма незначительно и им при расчете можно пренебречь.

Фазовый центр всех модификаций РРИпо можно считать расположенным, примерно в середине между сечением излома и геометрической вершиной основного рупора. Это подтвердилось при измерении фазовых диаграмм рупоров этого типа. Для определения точного положения фазового центра данных рупоров необходимы дополнительные исследования, но для практических целей, как правило, вполне достаточно определить его приближенно.

Экспериментальные исследования РРИпо, РРИпо-кс и РРИпо-кс-кс подтвердили справедливость изложенных выше рекомендаций по выбору оптимальных размеров.

Амплитудные и фазовые диаграммы РРИпо-кс ($2R_{2\max} = 14,357\lambda = 115$ мм; $2R_1 = 2,0\lambda = 16$ мм; $2\alpha_2 = 70^\circ$; $2\alpha_1 = 20^\circ$; $\gamma_{\text{по}} = 10^\circ$; $\beta_2 = 29^\circ$; $\beta_1 = 0$) в поперечной (а) и продольной (б) плоскости показаны на рис. 1.77.

Диаграммы данного РРИпо-кс были измерены на волне 8 мм, отличающейся от оптимальной в 1,14 раза, и на расстоянии 180 мм от фазового центра рупора.

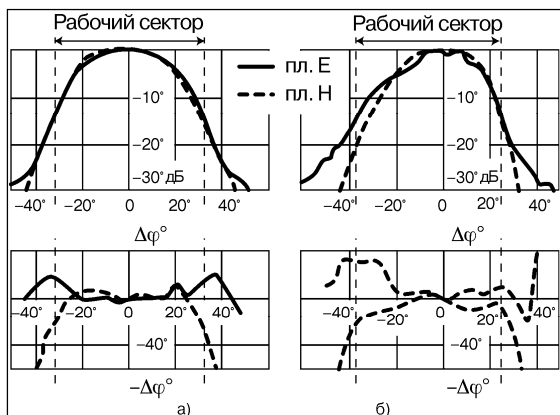


Рис. 1.77

Главный лепесток, как и ожидалось, в пределах рабочего сектора углов на обеих поляризациях идентичен. В поперечной плоскости он симметричен, в продольной — асимметричен. Фазовые искажения в пределах рабочего сектора углов весьма незначительны и существенного влияния на направленные свойства антенны оказать не могут.

Диаграммы направленности РРИпо-кс ($2R_{2\max} = 210$ мм; $2R_1 = 42$ мм; $2\alpha_2 = 70^\circ$; $2\alpha_1 = 22^\circ$; $\gamma_{\text{по}} =$

7° ; $\beta_2 = 18^\circ$; $\beta_1 = 0^\circ$) в поперечной плоскости (а) и продольной (б) приведены на рис. 1.78÷1.80.

На рис. 1.78÷1.80 (в) показаны также ДН в продольной плоскости РРИпо, имеющего те же размеры, что и РРИпо-кс, но с $\beta_2 = 0^\circ$, т. е. без косого среза

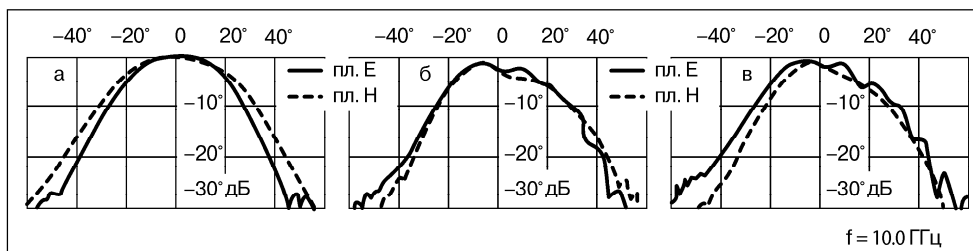


Рис. 1.78

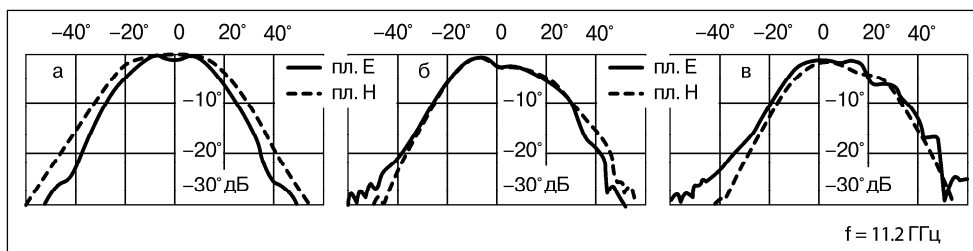


Рис. 1.79

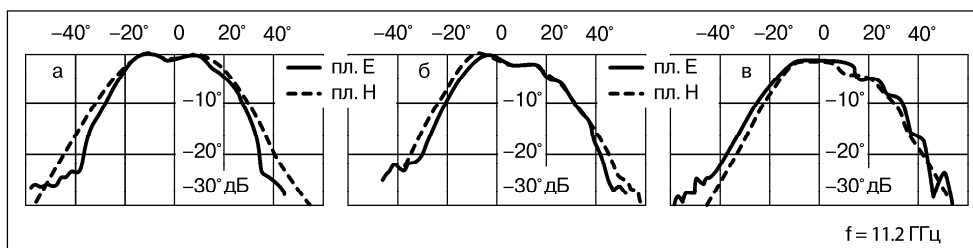


Рис. 1.80