

Реальный коэффициент усиления

(и КИП) модели антенны был измерен в широкой непрерывной полосе, захватывающей оба рабочих диапазона. На рис. 3.12 показана зависимость КИП от длины волны, отличающейся в пределах исследуемой полосы в $\sim 1,7$ раза.

На волне 8,25 мм коэффициент усиления (с зеркалом 1,1 м) равен 51,1 дБ, (КИП $\sim 0,725$). Максимальные значения КИП, достигающие 0,75, как и было задумано, соответствуют полосе низкочастотного диапазона, в которой расфазировка рупора $\Delta\varphi_{\Sigma} = 2\pi$ и форма главного лепестка наиболее близка к оптимальной. В пределах этой полосы (при изменении длины волны в $\sim 1,25$ раза) КИП выше 0,7, а за ее пределами, включая и второй, высокочастотный, рабочий диапазон, КИП больше 0,65. Реальные значения КИП достаточно хорошо совпадают с ожидаемыми, полученными в результате анализа ДН рупора и облучающей системы, о котором было сказано выше.

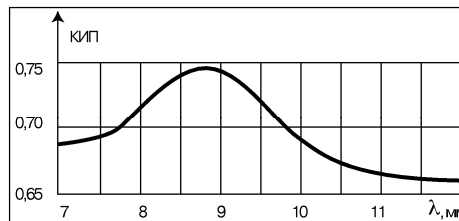


Рис. 3.12

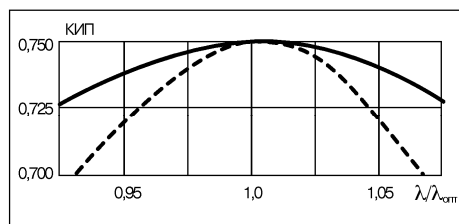


Рис. 3.13

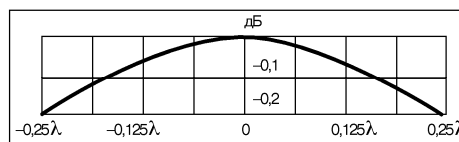


Рис. 3.14

На рис. 3.13 показана зависимость КИП от изменения длины волны — λ относительно оптимальной — $\lambda_{\text{опт}}$ при использовании двух облучающих систем: 1-я — рассмотренная выше, с РРИ; 2-я — с малым зеркалом специального профиля и с РК, имеющим осесимметричную куполообразную форму главного лепестка (см. рис. 3.4, справа).

Сравнение показывает, что при использовании «классического» рупора с канавками и вспомогательного зеркала специального профиля максимальное значение КИП на оптимальной волне также достигает значения 0,75, но с изменением длины волны КИП в этом случае уменьшается значительно быстрее, чем с РРИ.

На рис. 3.14 показаны потери усиления при перемещении РРИ вдоль фокальной оси антенны.

При смещении фазового центра рупора относительно фокуса вспомогательного зеркала в пределах $\pm 0,25\lambda$ потери не превышают 0,2 дБ. Это косвенно подтверждает, что РРИ не очень чувствителен к точности его установки относительно фокуса.

Основные достоинства и недостатки антенны.

Достоинства антенны, полученные за счет использования РРИ:

- Почти идеальная осевая симметрия главного лепестка антенны.
- Высокая эффективность в широком диапазоне (КИП — 0,65 — 0,75).
- Низкий уровень бокового излучения.
- Очень широкий (почти двухкратный) непрерывный рабочий диапазон.

Основными недостатками антенны, обусловленными данной схемой, как и большинства других осесимметричных антенн, являются:

- Реакция облучателя на отраженное зеркалом (зеркалами) поле, что ухудшает согласование антенны с питающим трактом.
- Затенение зеркала облучающей системой и элементами ее крепления, что уменьшает эффективность и увеличивает уровень бокового излучения.
- Трудность создания в раскрыве (глубоких зеркал) равномерного распределения амплитуды поля, обеспечивающего высокую эффективность.

Меньшей реакцией облучателя на отраженное поле обладают АДЭ, а затенения зеркала облучателем в осесимметричных зеркальных антеннах устранить невозможно. Что касается эффективности и других электрических параметров данной антенны, то они были значительно улучшены за счет использования в качестве первичного излучателя РРИ.

Исследования показали, что использование РРИ в качестве первичного облучателя в схеме этой короткофокусной антенны ($2\psi_0 = 180^\circ$) позволило без модификации профиля зеркал получить высокий КИП и низкий уровень бокового излучения в диапазоне, крайние частоты которого отличаются в 1,7 раза. Кроме того, на основании исследования направленных свойств РРИ (см. раздел 1.4.2), можно утверждать, что и за пределами данного диапазона антенна с РРИ не только сохраняет работоспособность, но и ее эффективность остается достаточно высокой.

Согласование данной антенны исследовано не было, так как измерения проводились на модели (на очень высоких частотах). Но, как показали исследования других антенн, оно, благодаря РРИ, должно быть лучше, чем с другими рупорами.

3.3.2. Антенны типа АДЭ

Антенна двухзеркальная с эллиптическим вспомогательным зеркалом (АДЭ), рис. 3.15, в общем случае состоит [2] из основного параболического зеркала диаметром D со смещенной фокальной осью и облучающей системы (коротко: облучателя), включающей малое, эллиптическое, зеркало и первичный, рупорный, облучатель. Некоторые АДЭ

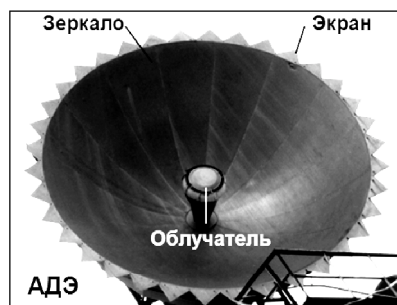


Рис. 3.15

оборудованы зубчатым экраном (см. рис. 3.15), улучшающим помехозащищенность антенны в заднем полупространстве.

Основное (большое) зеркало АДЭ образовано путем вращения параболы вокруг оси, которая не совпадает с осью симметрии антенны, а смещена параллельно ей на некоторое расстояние. Поэтому в АДЭ нет точечного фокуса, а имеется фокальное кольцо, диаметр которого (d_n) определяется смещением оси.

Схема облучающей системы АДЭ с первичным облучателем в виде РРИ и эллиптическим вспомогательным (малым) зеркалом показана на рис. 3.16.

Поверхность вспомогательного зеркала образована вращением отрезка эллипса (эллипс показан пунктиром) вокруг оси симметрии антенны. Малое зеркало, как и параболоид, имеет не точечный фокус, а фокальное кольцо диаметром d_3 , причем $d_3 \geq d_n$ (их различие должно быть небольшим, на рис. 3.16 оно искусственно преувеличено).

Принятые обозначения:

$2\psi_0$ — угол раствора основного зеркала; $2\psi'_0$ — сектор углов, охватываемых малым зеркалом; d_3 и d_n — диаметр фокального кольца параболического и эллиптического зеркала, соответственно, $d_3 \geq d_n$; ψ — угол между фокальной осью и произвольным лучом, отраженным от малого зеркала; ψ_3 — угол между фокальной осью и лучом, отраженным от кромки малого зеркала (если $d_3 = d_n$, то $\psi_3 = 0$); d_0 — диаметр малого зеркала, обычно $d_0 = d_n$; F_n — фокусное расстояние параболы; 2α и d_p — угол раствора и диаметр раскрытия рупора; O — фазовый центр рупора; O_3 и O_n — точки, расположенные на фокальном кольце эллиптического и параболического зеркала, соответственно; φ_1 и φ_2 — угол облучения из фазового центра рупора соответственно фокального кольца и кромки малого зеркала.

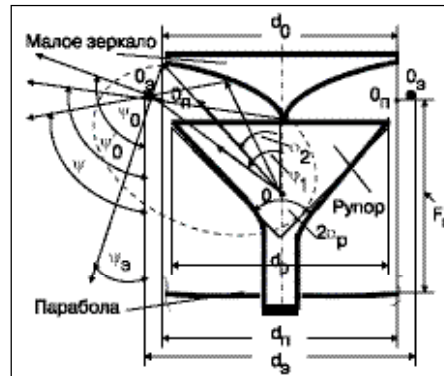


Рис. 3.16

Основные особенности антенн типа АДЭ, обусловленные их схемой [2]:

- В центральной части антенны (внутри соосного с зеркалом цилиндра диаметром d_n) образуется объем, не облучаемый полем, отраженным от малого зеркала. Поэтому потери из-за затенения в этой схеме примерно в два раза меньше, чем в классической. Если $d_3 > d_n$, то необлучаемый объем увеличивается. Это приводит к улучшению согласования, но увеличению (из-за дополнительного затенения) потерь усиления и уровня первых и ближних боковых лепестков по сравнению с вариантом, когда $d_3 = d_n$.
- Вследствие инверсии имеется переброс энергии, соответствующей центральной части диаграммы первичного излучателя на периферию основного зеркала и наоборот.
- Амплитудное распределение вблизи кромки основного зеркала имеет крутой спад, определяемый очень малым уровнем энергии, «отраженным» от острия вследствие его малой площади. Но в большей части раскрытия распределение амплитуды поля может быть близким к равномерному даже при куполообразной ДН первичного облучателя, что является не только достоинством данной схемы, но и ее недостатком, так как ограничивает возможности реализации низкого уровня первых (и ближних) боковых лепестков.
- Некоторый дополнительный спад энергии на краю основного зеркала можно обеспечить за счет направления поля, отраженного от центра малого зеркала не на кромку основного, а с некоторым смещением к его центру, при этом $\psi'_0 < \psi_0$.
- Специфическая форма малого зеркала — наличие в его центре острия, рассеивающего большую часть энергии за пределы рабочей зоны рупора, и большее (по сравнению с центром) удаление рабочей поверхности малого зеркала от раскрытия рупора позволяет приблизить малое зеркало почти вплотную к рупору обеспечив этим большую суммарную расфазировку ($\Delta\varphi_\Sigma$) при значительно меньших размерах рупора, чем в случае его расположения в дальней зоне.

В связи со специфическими особенностями схемы АДЭ использование в этих антеннах расфазированных рупоров в качестве первичных облучателей

является наиболее предпочтительным, а близость расположения малого зеркала и рупора позволяет объединить их в единый конструктивный блок — облучатель, привязав малое зеркало непосредственно к рупору. При этом большие, соизмеримые с малым зеркалом, размеры рупора являются достоинством, а не недостатком.

Особенности разработки систем крепления облучателя АДЭ [22] связаны с близким расположением рупора и малого зеркала. Ниже рассмотрено несколько систем крепления одного и того же блока облучателя, исследованных в процессе разработки и выбора наиболее оптимального варианта для антенны АДЭ-1/11 диаметром 1 м предназначенной для работы в диапазоне 11 ГГц (рабочая полоса — $10,7 \div 11,7$ ГГц, средняя частота $f_0 = 11,2$ ГГц, средняя длина волны $\lambda_0 = 26,786$ мм).

Размеры первичного облучателя (РР с плавным переходом): внутренний диаметр — $d_p = 170$ мм ($6,35\lambda_0$), $2\alpha = 90^\circ$.

Размеры основного и малого зеркала: $D = 1000$ мм ($37,33\lambda_0$); $2\psi_0 = 210^\circ$; $2\psi'_0 = 200^\circ$; $d_0 = 200$ мм ($7,47\lambda_0$); $d_3 = 207$ мм ($7,73\lambda_0$); $F = 153,5$ мм ($5,73\lambda_0$); $\varphi_1 = 45^\circ$, $\varphi_2 = 37,5^\circ$ эксцентриситет эллипса $\varepsilon = 0,769$.

Конструкция систем крепления обуславливает их достоинства и недостатки.

Система крепления I (рис. 3.17) — 4-е стеклопластиковые тяги шириной 4 мм, в которой несущей конструкцией является рупор. Поэтому стенки рупора утолщены, что привело к увеличению его внешнего диаметра.

Достоинства: отсутствие тепловых потерь и малое влияние на согласование. Недостатки: необходимость в укрытии, дополнительно ухудшающем параметры антенны.

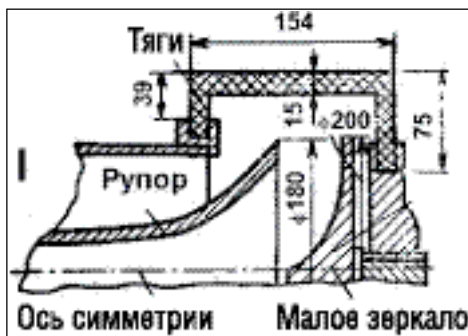


Рис. 3.17

Системы II, III и IV выполнены из пенополиуретана. Профиль внешней границы воздух-диэлектрик систем II и III (см. рис. 3.18 и 3.19) — конический, а системы IV (рис. 3.20) — полый тороид со специальным профилем стенок.

Достоинства систем II, III и IV: они могут служить не только для крепления зеркала, но одновременно выполнять и функции укрытия, герметизирующего облучатель, и функции устройства точной юстировки. Недостатки, требующие дополнительного исследования: тепло-



Рис. 3.18

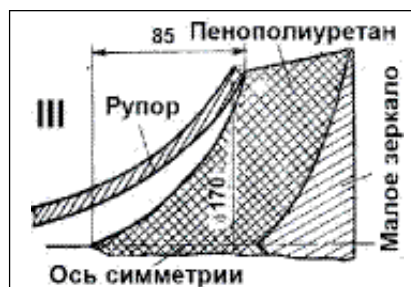


Рис. 3.19

вые потери в диэлектрике и его влияние на электрические характеристики.

Тепловые потери зависят от материала, плотности и объема диэлектрика, а влияние диэлектрика на направленные свойства облучателя и коэффициент отражения зависит, кроме того, и от формы границ воздух-диэлектрик. Для ослабления влияния диэлектрика желательно использовать диэлектрики (в данном случае, пенополиуретан) малой плотности, но это уменьшает механическую прочность системы крепления.

Система крепления V (она здесь не показана) представляет собой обычный полый конус, стенки которого (толщиной ~8 мм) выполнены из пенополиуретана.

Влияние систем крепления на направленные свойства рупора:

Система крепления I (см. рис. 3.17) вносит существенный вклад в уровень бокового излучения, т.к. тяги возбуждаются энергией значительной плотности.

Система крепления II (см. рис. 3.18) при удельной плотности пенополиуретана ~0,1 г/см³ изменяет ДН рупора таким образом, рис. 3.21, что уровень облучения кромки малого зеркала в плоскости E увеличивается.

Это приводит к дополнительным потерям на переизлучение, увеличению уровня бокового излучения, обусловленного переливными лепестками и дифракцией на кромке малого зеркала, а также к росту коэффициента отражения.

Система крепления III (см. рис. 3.19), благодаря модификации внутренней границы воздух-диэлектрик, позволила (при той же удельной плотности пенополиуретана ~0,1 г/см³) изменить форму главного лепестка рупора в плоскости E оптимальным образом, приблизив ее к ДН в плоскости H.

Уровень облучения кромки малого зеркала с системой крепления III по сравнению с системой II существенно понижается (см. рис. 3.21). Это приводит к уменьшению переизлучения энергии за кромки зеркала, уменьшению уровня бокового излучения и улучшению согласования. Кроме того (вследствие уменьшения объема пенополиуретана), несколько снижаются и тепловые потери. Существенно снизить тепловые потери и влияние пенополиуретана на направленные свойства рупора можно и путем уменьшения его удельной плотности до ~0,03 г/см³. Однако в этом случае внешнюю поверхность системы крепления необходимо упрочнить, например, слоем стеклоткани. Но это, как показали исследования, при конической форме данной поверхности, приводит к значительному ухудшению согласования.

Система крепления IV (см. рис. 3.20) позволяет снизить тепловые потери даже при значительной плотности пенополиуретана, так как его объем очень мал.

В этой системе даже при значительном увеличении плотности пенополиуретана (до

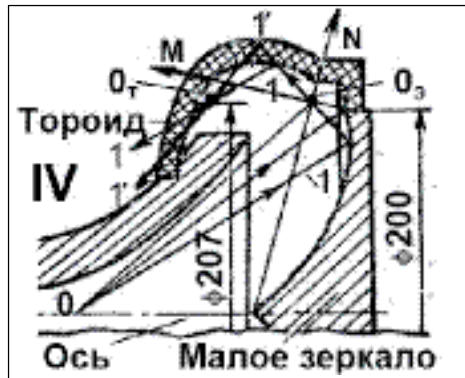


Рис. 3.20

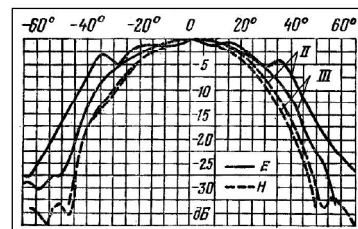


Рис. 3.21

$\sim 0,35 \text{ г/см}^3$) вследствие малой толщины стенок тороида ($6 \div 8 \text{ мм}$) тепловые потери возрастают не более чем на 0,3 дБ по сравнению с такой же системой, но имеющей плотность не более $0,05 \text{ г/см}^2$, которая практически не оказывает никакого влияния на электрические параметры антенны, а поэтому была принята в качестве эталона.

Кроме того, система крепления IV дает возможность почти полностью устранить отражения внутрь рупора от внешних и внутренних границ тороида, благодаря специальной форме его поверхности.

В секторе MN (рабочем), ограниченном краевыми лучами, отраженными от малого зеркала, внутренняя и внешняя поверхность тороида образована путем вращения вокруг оси фокального кольца антенны отрезков двух эллипсов (внутреннего и внешнего), один из фокусов которых (см. рис. 3.20) совпадает с фокусом эллипса O_3 , образующего малое зеркало, а другой (O_1) вынесен за пределы раскрытия рупора. Вне сектора MN профиль поверхности особой роли не играет и выбирается из конструктивных соображений. При таком исполнении основное поле, проходящее через диэлектрик, незначительно преломляется, а отраженные поля (лучи 1 и 1') отбрасываются соответственно внутренней и внешней стенкой тороида вне раскрытия рупора. Далее эти поля рассеиваются основным зеркалом, внося незначительный вклад в боковое излучение антенны.

Однако практическое использование системы крепления IV возможно лишь при наличии укрытия антенны в целом. Если же антенна не имеет такого укрытия, то внешнюю поверхность тороида (даже при сравнительно большой плотности пенополиуретана) необходимо упрочнить, например, слоем стеклоткани. Стеклоткань, принимая форму тороида, не ухудшает согласования антенны, но вызывает дополнительные потери усиления на $0,1 \div 0,2 \text{ дБ}$ и незначительное повышение уровня бокового излучения.

Влияние систем крепления на согласование антенны показано на рис. 3.22, где приведена зависимость от частоты коэффициента отражения ($\Gamma \%$) от входа облучателя при использовании разных систем крепления.

Высокое общее значение коэффициента отражения объясняется тем, что в данной антенне использован РР, имеющий разную ширину главного лепестка в пл. Е и Н. Поэтому уровень облучения кромки малого зеркала в пл. Е со всеми системами крепления — (исключая III, которая улучшает ДН в плоскости Е) весьма высок, что и определило повышенный уровень поля, отраженного в рупор.

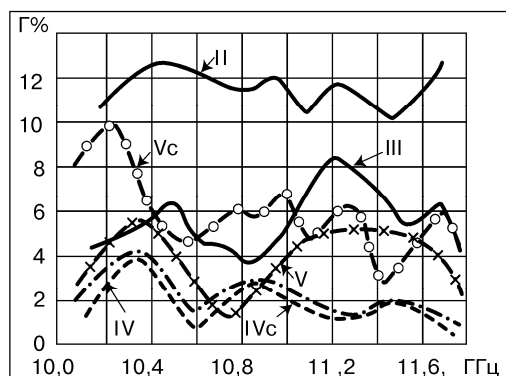


Рис. 3.22

Система крепления I на согласование антенны заметного влияния не оказывает, так как большая часть энергии, отраженной от тяг, уходит за пределы рупора, кроме того, они имеют небольшую ширину.

Система крепления II дает наиболее высокий коэффициент отражения ($10 \div 13 \%$). Это объясняется не только отражением поля внутрь рупора от конической поверхности раздела воздух-диэлектрик, но и отрицательным влиянием диэлектрика на ДН в пл. Е, о чем уже было сказано выше.

Система крепления III, благодаря изменению внутренней формы диэлектрика, позволившему улучшить ДН в пл. Е, имеет более низкий коэффициент отражения (ниже 8 %), несмотря на сохранение конической формы границы раздела.

Система крепления IV — полый тороид позволяет снизить коэффициент отражения до 4 %, и ниже, причем только за счет тороидальной формы. Кроме того, наличие на ее верхней поверхности талого снега толщиной в несколько сантиметров практически не оказывает влияния на коэффициент отражения (IVc).

Система крепления V — полый конус обеспечивает коэффициент отражения меньше 6,5%. Но при наличии на ней талого снега в несколько сантиметров коэффициент отражения (на нижних частотах) увеличивается до 9,5% (Vc), т. е. на 3%. А это весьма опасно, если антенна эксплуатируется без укрытия ее в целом.

Влияние талого снега должно наблюдаться и на других тороидальных и конических системах крепления. Однако в системах II и III его труднее обнаружить из-за высокого их собственного коэффициента отражения, связанного с влиянием диэлектрического заполнения на ДН рупора.

Из анализа полученных результатов следует, что наименьшее (отрицательное) влияние на согласование антенны оказывает система крепления IV — полый тороид с поверхностью специального профиля.

Влияние систем крепления на направленные свойства антенны в пл. Н заметнее, чем в пл. Е, потому что в этой плоскости собственный (без вклада системы крепления) уровень бокового излучения ниже. Поэтому здесь рассмотрены ДН только в пл. Н и только в переднем полупространстве, которым (в короткофокусных антеннах) ограничивается вклад системы крепления в уровень бокового излучения.

На рис. 3.23 приведены ДН антенны, измеренные на частоте 10,7 ГГц.

Сплошными линиями со штриховкой показаны ДН антенны с полым тороидом очень малой плотности ($\sim 0,05$ г/см³), который, как уже было сказано, принят в качестве эталона, так как не оказывает заметного влияния на электрические параметры антенны.

Система крепления I (см. рис. 3.23, слева) значительно повышает уровень бокового излучения как в плоскости расположения тяг (пунктир), так и в плоскости, повернутой к ней на 45° (точки), а потери усиления составляют $\sim (0,3 \div 0,5)$ дБ.

Системы крепления II и IV (см. рис. 3.23, справа) почти не оказывают влияния на уровень бокового излучения антенны. Однако при использовании системы

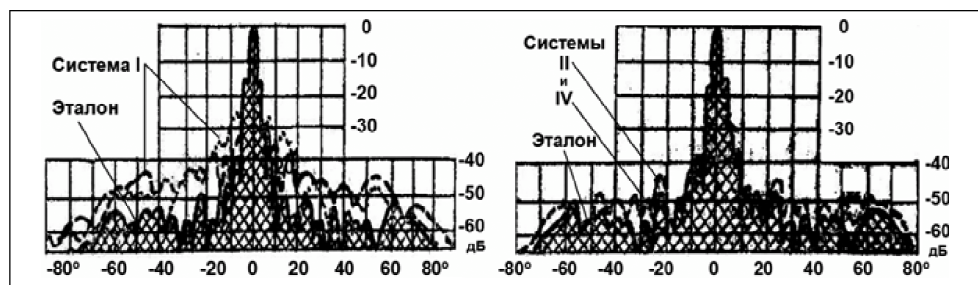


Рис. 3.23

II (при плотности пенополиуретана $\sim 0,1 \text{ г/см}^3$) потери усиления по сравнению с эталоном составляют $\sim 1,5 \text{ дБ}$. При использовании системы IV (при той же плотности пенополиуретана и, к тому же, упрочненной стеклотканью), они равны всего лишь $0,2 \text{ дБ}$. И хотя система II не увеличивает уровень бокового излучения, но использовать ее (из-за больших тепловых потерь) нецелесообразно.

Оптимальными системами крепления, которые могут быть использованы даже тогда, когда антенна в целом не имеет укрытия, являются:

- Полый торонд со специальной формой внешней и внутренней поверхности границ раздела воздух-диэлектрик, изготовленный из пенополиуретана плотностью $\sim (0,1 \div 0,2) \text{ г/см}^3$, упрочненный, если антенна не имеет укрытия, стеклотканью.
- Частичное заполнение пространства между стенками рупора и поверхностью вспомогательного зеркала пенополиуретаном плотностью $\sim 0,03 \text{ г/см}^3$. В этом случае внутренняя и внешняя граница воздух-диэлектрик должна быть также выполнена по специальному профилю. И, если антенна не имеет укрытия, то внешняя поверхность должна быть упрочнена стеклотканью.

Рассмотренные выше оптимальные системы крепления облучателя разработаны для АДЭ, но заложенные в них принципы можно использовать и в других типах антенн, особенно там, где рупор расположен вблизи малого зеркала.

Особенности разработки облучающих систем для антенн типа АДЭ [20] также связаны с специфической геометрической схемой этих антенн, включая и очень близкое взаимное расположение элементов облучающей системы, что вызывает разное на разных частотах и весьма существенное изменение в пределах зоны облучения малого зеркала амплитудных и фазовых характеристик первичного излучателя. Поэтому, наряду с выполнением общих требований, изложенных в разделе 3.2, необходимо учитывать некоторые специфические особенности этой антенны и при ее разработке соблюдать определенные требования, в частности:

- $d_p < d_0$, где d_p — диаметр рупора, d_0 — диаметр малого зеркала;
- $l > \lambda/4$ (на самой длинной волне рабочего диапазона), где l — расстояние от раскрытия рупора до острия малого зеркала, но при необходимости острие малого зеркала можно приблизить почти вплотную к раскрытию рупора;
- отдавать предпочтение РР и РРИ разных модификаций.

Ниже рассмотрены некоторые особенности оптимизации антенн типа АДЭ по эффективности и согласованию путем оптимизации облучающей системы в целом.

Дополнительная оптимизация антенн АДЭ по эффективности возможна за счет оптимизации характеристик рупора с учетом влияния ближней зоны и создания оптимального и плавного (без существенных осцилляций) распределения амплитуды поля на поверхности малого зеркала. Это можно

обеспечить путем определенного изменения расфазировки рупора в пределах сектора облучения зеркала.

Оптимальное распределение на поверхности зеркала, как показала практика, получается, когда на расстоянии, соответствующем расстоянию от фазового центра рупора до плоскости, проходящей через кромки малого зеркала, $\Delta\varphi_{\Sigma} \approx 2\pi$, а на расстоянии до его острия $-\Delta\varphi_{\Sigma} \approx 3\pi$.

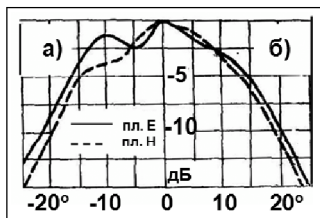


Рис. 3.24

На рис. 3.24 показано для сравнения распределение амплитуды поля на поверхности малого зеркала для двух случаев изменения (по мере приближения от края зеркала к его центру) расфазировки ($\Delta\varphi_\Sigma$): а) — расфазировка в пределах сектора облучения зеркала рупором, выполненным по схеме РРИ, меняется от 2π до 4π , б) — от 2π до 3π .

В первом случае (см. рис. 3.24а) наблюдаются значительные осцилляции и существенное различие ДН в пл. Е и Н. Во втором случае (см. рис. 3.24б) осцилляции в распределении амплитуды поля практически отсутствуют. Кроме того, распределение амплитуды поля, учитывая дальнейшую инверсию энергии, осуществляемую малым зеркалом в антеннах АДЭ (периферийная часть вспомогательного зеркала освещает центральную часть основного зеркала, а центральная его часть — периферийную), ближе к оптимальному, чем в первом случае.

Оптимизация амплитудных характеристик с учетом влияния ближней зоны, как показали экспериментальные исследования, может дать дополнительный выигрыш в усилении на $5 \div 10\%$, но в сравнительно узкой полосе частот.

Оптимизация АДЭ по согласованию, как и других антенн, достигается не только за счет улучшения собственного согласования рупора, но и уменьшения внешних отраженных и дифракционных полей, способных попасть внутрь рупора.

Влияние рупора на согласование антенны зависит от его типа и схемы. Коэффициент отражения рупоров, используемых в АДЭ (РР с согласующими переходами и РРИ) обычно не превышает $1 \div 2\%$, а вопрос дополнительного улучшения их согласования подробно рассмотрен в разделе 1.7.

Влияние острия малого зеркала связано с формой дифракционной ДН острия, определяемой углом γ , рис. 3.25, и величиной углового сектора, в пределах которого лучи, дифрагированные на острие, перехватываются рупором.

При заданном угле конуса (γ) влияние острия ослабляется при уменьшении сектора облучения раскрыва рупора этим полем, т. е. при увеличении угла (γ_0) между лучом 3, отраженным от острия, и дифракционным лучом 4. Увеличение γ_0 достигается за счет увеличения расстояния Δ между раскрывом рупора и острием вспомогательного зеркала и/или за счет уменьшения раскрыва рупора (d_p).

На рис. 3.26 приведены графики, характеризующие зависимость коэффициента отражения ($\Gamma\%$) от изменения угла γ_0 при фиксированном значении $\gamma_k = 24^\circ$ и от изменения угла γ_k при фиксированном значении $\gamma_0 = 32^\circ$, где γ_k — угол между лучом 1, отраженным от кромки малого зеркала, и лучом 2, дифрагированным на этой же кромке и падающим в направлении кромки рупора.

Эти графики построены на основании экспериментальных

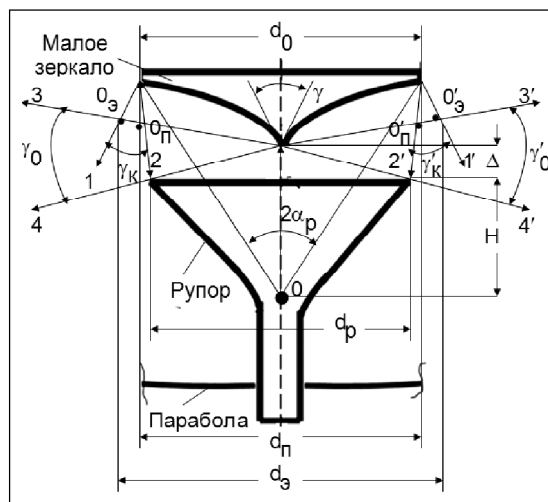


Рис. 3.25

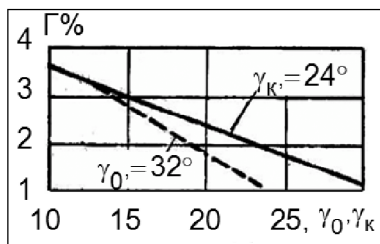


Рис. 3.26

исследований одного из облучателей АДЭ, с малыми зеркалами, имеющими разные диаметры фокальных колец. Данные результаты определяют лишь характер зависимости, а не абсолютную величину коэффициента отражения, которая для разных облучателей различна.

Влияние кромки малого зеркала зависит от уровня ее облучения и от угла, под которым виден рупор со стороны кромки. Уровень облучения кромки следует уменьшать, но если он

станет меньше оптимального, то возникают потери усиления. Поэтому иногда целесообразнее увеличивать угол γ_k , так как при этом уменьшается сектор облучения рупора и уровень поля, излучаемого в его направлении. Угол γ_k можно увеличить, уменьшая раскрыв рупора и/или увеличивая разницу между фокальными кольцами ($d_3 > d_0$), см. рис. 3.25. При этом часть поля от кромки малого зеркала (отраженного и дифракционного) пройдет мимо рупора.

При существенном различии между d_0 и d_3 возникает, однако, недооблучение центральной части основного зеркала, т.е. как бы увеличивается затенение раскрыва антенны. Это может привести к заметным потерям усиления и к росту первых и ближних боковых лепестков. Поэтому следует следить за тем, чтобы это «эквивалентное» затенение не превышало допустимой величины. Но при правильном выборе d_0 и d_3 согласование улучшается без заметных потерь усиления или даже при небольшом выигрыше, объясняемом благоприятным перераспределением поля в раскрыве антенны вследствие различия d_0 и d_3 .

Влияние центральной части основного зеркала на согласование (при фиксированном уровне облучения кромки малого зеркала) ослабляется при $d_3 > d_n$ и $d_3 > d_0$.

При этом, как уже было сказано, могут возникнуть потери усиления и повыситься уровень ближних боковых лепестков, включая первые. Однако (в оптимальном случае) влияние на согласование центральной части основного зеркала (в схеме АДЭ) можно устранить почти полностью без заметного ухудшения основных параметров антенны.

Влияние расстояния между раскрывом рупора и острием малого зеркала можно использовать для улучшения согласования антенны в определенной полосе частот за счет противофазного сложения части отраженных полей. Такой прием был использован в АДЭ, оптимизированной по эффективности и согласованию.

АДЭ с повышенной эффективностью и улучшенным согласованием

[20], предназначенная для работы в диапазоне 7,9÷8,4 ГГц., была оптимизирована на средней частоте $f_0 = 8,15$ ГГц ($\lambda_0 = 36,81$ мм) этого диапазона. В качестве первичного излучателя использован РПИ с плавно искривленной образующей.

Размеры антенны: $D = 1000$ мм ($27,17\lambda_0$); $2\psi_0 = 210^\circ$; $d_0 = d_n = 200$ мм ($5,43\lambda_0$); $d_3 = 210$ мм ($5,7\lambda_0$); $L = 153,7$ мм ($4,17\lambda_0$); $\varphi_1 = 30^\circ$, $\varphi_2 = 25^\circ$, $F = 153,5$ мм.

Размеры рупора: $2R_2 = 137$ мм ($3,72\lambda_0$), $2\alpha_2 = 48^\circ$, $2R_1 = 70$ мм ($1,9\lambda_0$). Переход от сечения излома к сечению волновода выполнен в виде параболического перехода длиной 150 мм.

Кривые настройки антенны, измеренные на крайних и средней частотах рабочего диапазона, показаны на 3.27. Максимуму сигнала на частоте 8,15 ГГц

соответствует расстояние между рупором и острием малого зеркала $\Delta = 5$ мм. Смещение максимумов настройки на разных частотах объясняется тем, что в данном РРИ (с малым рупором, имеющим параболическую образующую) не было выполнено условие его синфазности. И это привело к существенной зависимости положения фазового центра от частоты. В других антеннах (при соблюдении указанного условия) максимумы настройки на всех частотах рабочего диапазона такой же ширины практически полностью совпадали.

Диаграммы направленности рупора, измеренные на частоте 8,15 ГГц, показаны на рис. 3.28. Осевая симметрия главного лепестка данного РРИ (с малым параболическим рупором) несколько хуже, чем обычного, но зато лучше согласование.

Измерения проводились на окружности, проходящей через кромки малого зеркала при установке рупора в положение, соответствующее оптимальной (по КИП) настройке антенны.

Коэффициент отражения рупора и антенны, измеренный на входе рупора в диапазоне 7,6÷9,0 ГГц, который значительно шире рабочего диапазона, показан на рис. 3.29.

В полосе 7,6÷8,6 ГГц, оптимизированной по согласованию, где сигналы, отраженные от неоднородностей облучающей системы, складываются близко к противофазе, коэффициент отражения антенны не превышает 1,5 %, а рупора — 0,5%.

Диаграммы направленности антенны (без зубчатого экрана), измеренные на обеих поляризациях (сплошная линия — пл. Е, пунктир — пл. Н) на средней волне рабочего диапазона, где $D/\lambda \approx 27,2$, $G_{\max} \approx 37,8$ дБ, показаны на рис. 3.30 [20].

В верхней части (в растянутом масштабе) приведены главные лепестки и ДН в переднем полупространстве. В нижней — в заднем. Штрих-пунктирной линией 1 нанесена ДН МСЭ, действовавшая во время разработки антенны:

$G(\theta) = 52 - 10 \log(D/\lambda) - 25 \log \theta$ — для ближнего бокового излучения и $G(\theta) = 0$ — для дальнего, пересчитанная по (3.14) к G_{\max} . Линией 2 — универсальная ДН, рассчитанная по (3.15).

АДЭ-1/11 этим ДН МСЭ почти удовлетворяют, исключая первые боковые для 1 и 2, а также отдельные выбросы в пл. Е в секторе дальнего и заднего излучения.

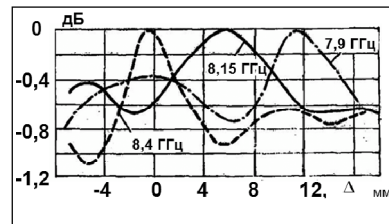


Рис. 3.27

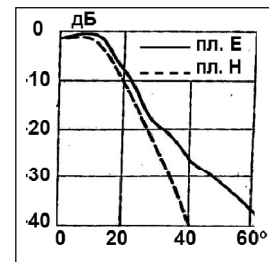


Рис. 3.28



Рис. 3.29

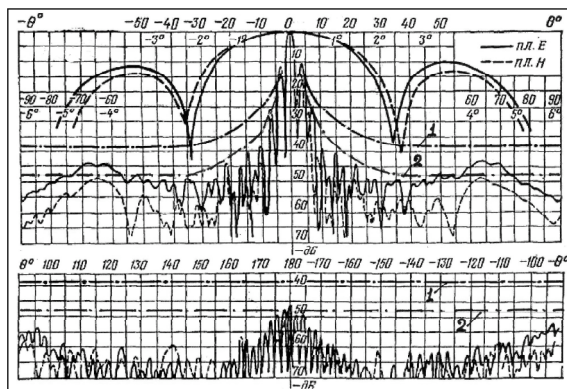


Рис. 3.30

Коэффициент усиления, измеренный методом сравнения с эталонной антенной, на средней частоте — 8,15 ГГц равен 37,8 дБ (КИП — 0,83). На крайних частотах диапазона — 8,4 и 7,9 ГГц (при оптимальной настройке антенны на средней частоте, $\Delta = 5$ мм) он соответственно равен 37,0 дБ и 36,3 дБ (КИП — 0,64 и 0,69).

Снижение КИП на крайних частотах объясняется тем, что для них $\Delta = 5$ мм соответствует минимуму сигнала (см. рис. 3.27), но этого снижения КИП, как уже было сказано, можно избежать.

Основные недостатки антенны:

- Очень высокий уровень первых боковых лепестков: $-(10 \div 14)$ дБ.
- Высокий уровень максимумов кроссполяризации: $-(18 \div 20)$ дБ.

Первый недостаток, является недостатком данной конкретной антенны. Он объясняется большим затенением основного зеркала вспомогательным, равным $0,2D$, а также дополнительным «затенением» из-за недооблучения его центра вследствие того, что $d_3 > d_n$. При использовании аналогичной облучающей системы в других антеннах этого типа, например, в АДЭ-5, где затенение не превышает $0,1 D$, уровень первых боковых лепестков составляет порядка -20 дБ.

Второй недостаток связан с большим углом раствора основного зеркала, который, однако, делает антенну более компактной, позволяет уменьшить уровень дальнего бокового излучения и улучшить защитное действие антенны без установки дополнительных защитных экранов.

Достоинства антенны, полученные за счет использования РРИ и оптимизации облучающей системы:

- Практически осевая симметрия главного лепестка ДН антенны.
- Очень хорошее согласование с питающим трактом в пределах рабочего диапазона (7,9 — 8,4 ГГц).
- Высокая эффективность.

3.4. Рупорно-параболические антенны (РПА)

3.4.1. Общие сведения

Рупорно-параболические антенны (РПА) относятся к классу неосесимметричных антенн, т.к. имеют одну плоскость симметрии.

Отражающее зеркало РПА, рис. 3.31, представляет собой часть параболоида вращения — 1. Ее раскрыв (проекция на плоскость, перпендикулярную фокальной оси) имеет трапецеидальную (см. рис. 3.31) или круглую форму. Облучателем — 2 — этой антенны служит пирамидальный (или конический) расфазированный рупор (РР), примыкающий к зеркалу, но вынесенный за пределы ее раскрыва. Поэтому почти вся энергия, излучаемая рупором (исключая энергию, излучаемую в направлении верхней кромки), перехватывается зеркалом, а волны, отраженные от зеркала, в рупор не попадают.

Схема и обозначение основных геометрических размеров пирамидальной РПА показаны на рис. 3.32.

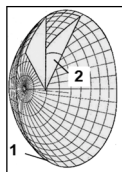


Рис. 3.31

F — фокусное расстояние исходного параболоида; S — площадь раскрыва, $2\psi_0$ угол раствора в продольной плоскости; $2\varphi_0$ — угол раствора в поперечной плоскости; x_1, x_0, x_2 — расстояние от фокальной оси до нижней, центральной и верхней кромки зеркала, соответственно. Угол раствора РПА выбирается, обычно, в пределах $30 \div 50^\circ$, ось рупора направлена вертикально вниз, а для дополнительного

улучшения согласования устанавливается плавный переход.

Достоинства РПА, определяемые ее схемой:

1. Очень широкий рабочий диапазон (многократный).
2. Достаточно высокая эффективность (КИП примерно $0,5 \div 0,7$).
3. Хорошее согласование с питающим трактом ($K_{СВ} < 1,02 \div 1,06$).

4. Очень низкий уровень бокового излучения в поперечной плоскости (наиболее важной для антенн РРЛ), включая защитное действие (на $20 \div 30$ дБ ниже уровня изотропного излучения).

5. Вертикальный выход облучателя, который можно рассматривать как достоинство при расположении аппаратуры внизу высокой опоры и при использовании жесткого волноводного тракта.

Первые два параметра определяются тем, что в схеме РПА в качестве облучателя используется РР, имеющий очень большую расфазировку, который, однако, наделяет ее не только положительными, но и отрицательными свойствами.

Недостатки РПА, определяемые ее облучателем и схемой:

1. Разная ширина главного лепестка ДН по поляризациям.
2. Высокий уровень первых боковых лепестков в пл. Е ($-15 \div 17$ дБ).
3. Высокий уровень бокового излучения в продольной плоскости.
4. Высокий уровень кроссполяризации в поперечной плоскости.
5. Очень большие габариты (особенно продольный размер), а поэтому большая масса, материалоемкость, стоимость и трудность транспортировки.
6. Жесткая схематическая связь зеркала с облучателем, что затрудняет оптимизацию электрических параметров последнего.
7. Обязательная герметизация и укрытие раскрыва антенны в целом.

Первые два недостатка имеют место только при использовании неоптимизированного РР.

Кроме того, защитные крышки антенн старых конструкций значительно ухудшают изначально очень хорошие электрические параметры РПА. А современные радиопрозрачные пленочные укрытия не очень надежны с механической точки зрения. Но, несмотря на весьма существенные недостатки, именно РПА (на заре развития РРЛ) нашли наиболее широкое применение на магистральных линиях связи, так как они (по сравнению с другими типами антенн того времени) имели самые высокие электрические параметры из наиболее важных для антенн РРЛ.

Немаловажным преимуществом для того времени являлся и вертикальный выход облучателя, так антенны магистральных линий устанавливаются обычно на высоких опорах, а для их связи с аппаратурой использовался тогда только жесткий волноводный тракт, так как гибких волноводов в те времена еще не было.

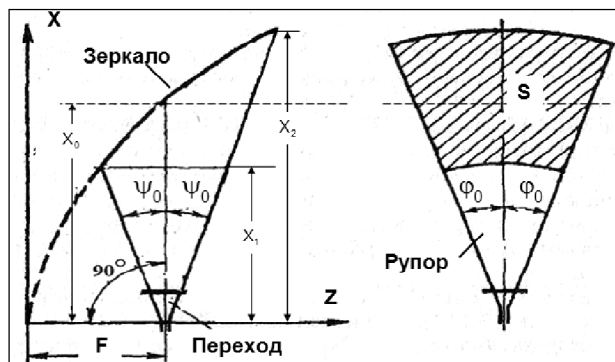


Рис. 3.32

С расширением сети связи и появлением РРЛ местного значения (с малыми пролетами и несколько меньшими требованиями к электрическим параметрам) возникла необходимость в разработке более простых, легких и дешевых антенн, обладающих, однако, достаточно хорошими электрическими параметрами. Это привело к широкому внедрению в серийное производство осесимметричных (однозеркальных и двухзеркальных) антенн разных типоразмеров, параметры которых, были улучшены за счет улучшения параметров облучателя.

Тенденция улучшения помехозащищенности (в отдельных направлениях поперечной и продольной плоскости, где имеются весьма высокие дифракционные лепестки) коснулась и РПА. Кроме того, возникла необходимость преодоления трудностей по транспортировке РПА, имеющих увеличенные (по сравнению с типовой антенной) размеры. Поэтому и в этих направлениях были также проделаны определенные работы, о которых сказано ниже.

3.4.2. Равноугольная пирамидальная РПА

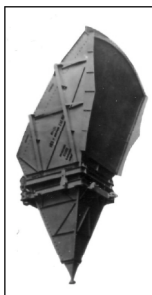


Рис. 3.33

Пирамидальная РПА, рис. 3.33, используемая более полувека на магистральных РРЛ нашей страны, описана во многих работах, в частности [1], [3], [64]. Она имеет примерно равный размер раскрыва в продольной (вертикальной) и поперечной (горизонтальной) плоскости, а ее волноводный выход направлен вертикально вниз. Раскрыв этой РПА закрыт крышкой, изготовленной из пенопласта, которая обеспечивает герметизацию всей антенны в целом.

Основные размеры [64], см. рис. 3.22: $2\psi_0 = 2\varphi_0 = 35^\circ$, $x_1 \approx 3,17$ м, $x_2 \approx 5,9$ м, $F \approx 2,16$ м, $S \approx 7,5$ м².

Несмотря на то, что расчетная эффективность этой антенны весьма высока, но ее реальный КИП невелик (порядка 0,6), что объясняется как недостаточной точностью изготовления поверхности рефлектора, так и большими потерями в защитной крышке, которая, к тому же, значительно увеличивает и уровень бокового излучения.

На рис. 3.34 — 3.36 показаны [64], расчетные (сплошная линия) и экспериментальные (пунктир) ДН антенны вблизи главного направления при поперечной (слева) и при продольной (справа) поляризации относительно оси антенны.

На рис. 3.34 и рис. 3.35 приведены главные и первые боковые лепестки ДН антенны для поперечной (горизонтальной) и продольной (вертикальной) плоскости антенны, соответственно. При этом в обеих плоскостях наблюдается сильное отличие по поляризациям ширины главного лепестка и уровня первых боковых лепестков (в пл. Е он значительно выше).

На 3.36 показаны кросс-поляризационные ДН вблизи направления главного излучения в поперечной плоскости, из которых следует, что уровень максимумов кроссполяризации этой антенны, как и других РПА, весьма высок и составляет $-(16 - 18$ дБ). В продольной плоскости РПА, как и другие неосе-

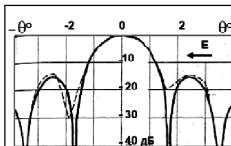


Рис. 3.34

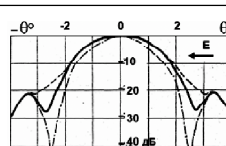
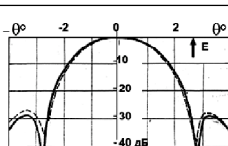
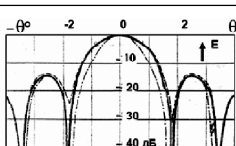


Рис. 3.35



симметричные антенны, кросс-поляризационных максимумов не имеет.

Приведенные выше ДН являются типичными для равноугольных РПА, если в них в качестве облучателя используется обычный РР.

На рис. 3.37 показаны на горизонтальной (слева) и вертикальной (справа) поляризации экспериментальные ДН в горизонтальной плоскости одной из самых первых отечественных РПА [64].

Более подробные сведения о модернизированной РПА (РПА-2П), имеющей модифицированную крышку и боковые щитки, улучшающие помехозащищенность антенны (см. рис. 3.33), приведены в [1] и [3].

Несмотря на то, что РПА оказалась долгожительницей, с развитием сети РРЛ потребовались антенны разных типоразмеров, включая антенны и с большим, и с меньшим коэффициентом усиления, а также с еще более низким уровнем бокового излучения в горизонтальной плоскости. Поэтому широкое развитие получили антенны самых разных типов, особенно, осесимметричные, среди которых очень много антенн с большей, чем у РПА, площадью раскрытия, позволяющей реализовать более высокие значения КУ.

Разработчики антенн продолжали модернизировать и РПА, улучшая ее параметры за счет использования новых, особо прочных, радиопрозрачных пленок и поглощающих материалов. Однако возможно улучшение параметров РПА и за счет изменения ее конструктивной схемы.

3.4.3. Улучшение помехозащищенности

Разработка различных устройств, с помощью которых можно улучшить помехозащищенность как существующих, так и вновь разрабатываемых антенн разных типов, а не только РПА, представляет большой практический интерес.

Некоторые методы подавления уровня бокового излучения при помощи разных щитков и фланцев были исследованы еще в 1967 году [64]. Однако в открытой печати сообщение об этом [26] появилось только спустя 14 лет. Но так как развитие антенн шло своим чередом, то некоторые из этих методов, найденные как независимо, так и с использованием результатов первых их разработчиков, были опубликованы другими авторами раньше. Ниже рассмотрены конкретные способы и даны практические рекомендации по подавлению уровня бокового излучения РПА при помощи очень простых устройств, часть которых, включая зубчатые экраны, была использована и в антеннах других типов, в частности, в АДЭ и АВО.

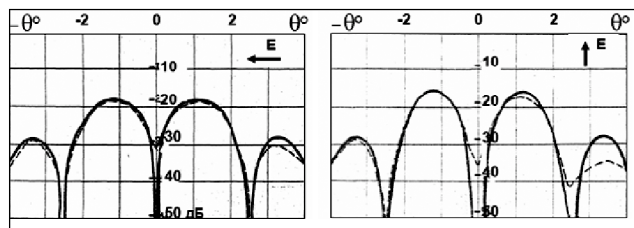


Рис. 3.36

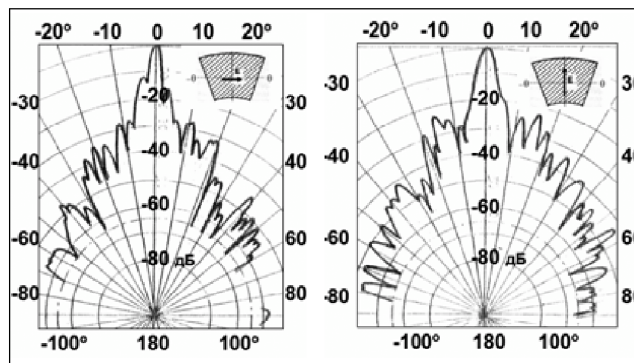


Рис. 3.37

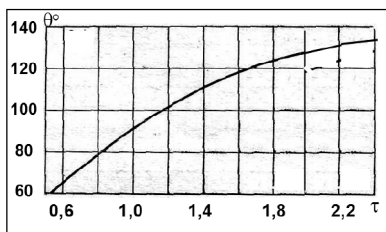


Рис. 3.38

Повышенный уровень бокового излучения РПА наблюдается в горизонтальной плоскости при горизонтальной поляризации и в вертикальной плоскости при вертикальной поляризации, т. е. в тех случаях, когда боковые и верхняя кромка антенны облучаются повышенным уровнем, который имеет место (из-за разной ширины главного лепестка рупора в плоскостях Е и Н) при использовании в качестве облучателя обычного РР.

В горизонтальной плоскости при горизонтальной поляризации увеличенные дифракционные лепестки обусловлены синфазным сложением дифракционных лучей от боковых кромок антенны, ограничивающих раскрыв. Ориентировка этих лепестков зависит от величины и соотношения углов раствора облучающего рупора. На рис. 3.38 показана зависимость угла θ , под которым расположен максимум дифракционного лепестка, от соотношения углов раствора рупора ($\tau = \text{tg} \varphi_0 / \text{tg} \psi_0$).

Направления θ , в которых наблюдаются увеличенные лепестки, определяются по формуле:

$$\theta = \pm 2 \arctg (\text{tg} \varphi_0 / \text{tg} \psi_0), \quad (3.18)$$

где $2\varphi_0$ — угол раствора рупора в поперечной плоскости антенны (параллельной плоскости раскрыва), $2\psi_0$ — угол раствора рупора в продольной плоскости антенны (перпендикулярной раскрыву).

Из (3.18) следует, что направлением увеличенных лепестков можно легко управлять («шевелить ушами»), изменяя соотношение углов φ_0 и ψ_0 . Это дает возможность при конструировании новых РПА использовать такое соотношение углов, при котором увеличенные лепестки направлены под заранее выбранными и наименее помехоопасными углами. Но эти углы для разных пунктов РРЛ различны и могут со временем меняться. Поэтому более целесообразно управлять ориентировкой и уровнем этих лепестков, применяя съемные экраны.

Плоские фланцы, рис. 3.39, установленные перпендикулярно боковым стенкам антенны, позволяют значительно уменьшить уровень увеличенных дифракционных лепестков, расположенных, если $\varphi_0 \geq \psi_0$, под углами $\theta \geq 90^\circ$ от направления главного излучения.

При наличии такого фланца лучи, дифрагированные на кромках боковых стенок, испытывают вторичную дифракцию на его внешней кромке. В результате при той же ориентировке уровень дифракционных лепестков ослабляется.

На рис. 3.40 показана зависимость уровня дифракционных лепестков от ширины плоского фланца.

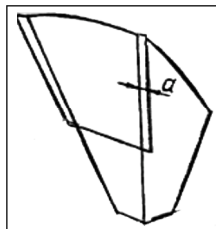


Рис. 3.39

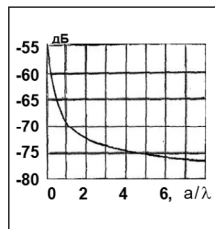


Рис. 3.40

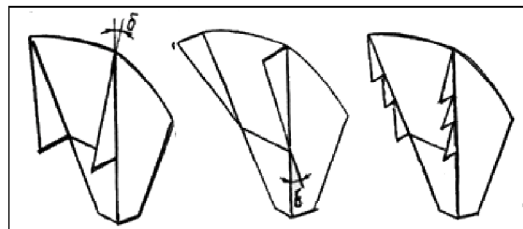


Рис. 3.41

Эта зависимость, полученная экспериментально при исследовании РПА с $2\varphi_0 = 49^\circ$ и $2\psi_0 \approx 22^\circ$ (см. раздел 3.4.4), нелинейная, поэтому применение фланца шириной больше $3\div 4\lambda$ нецелесообразно. При $\varphi_0 \leq \psi_0$, когда лепестки расположены под $\theta \leq 90^\circ$, такой фланец вообще не работает.

Треугольные экраны [26], [64], рис. 3.41, эквивалентны изменению угла ψ_0 . Угол δ (между кромкой боковой стенки РПА и внешней кромкой экрана) выбирается в зависимости от заданного направления по формуле:

$$\delta = \psi_0 - \arctg[\tg\varphi_0/\tg(\theta/2)]. \quad (3.19)$$

Если $\delta > 0$ (это эквивалентно уменьшению угла ψ_0), то треугольный экран устанавливается по рис. 3.41, слева. Если $\delta < 0$ (это эквивалентно увеличению ψ_0), то согласно рис. 3.41, в центре. При эквивалентном уменьшении ψ_0 лепесток перемещается в сторону больших углов. Поэтому установка на боковых стенках РПА ($2\psi_0 = 2\varphi_0 = 50^\circ$) треугольного экрана ($\delta = 18^\circ$) приводит к смещению имеющихся у нее под углами $\pm 90^\circ$ повышенных лепестков в область углов $\pm(140\div 150)^\circ$ и уменьшению их уровня на $8\div 12$ дБ.

Треугольные экраны (с целью уменьшения габаритов) можно заменить несколькими секциями, имеющими меньший поперечный размер, но равный (с соответствующим большим экраном) угол δ (см. рис. 3.41, справа). Можно их сделать и из разных секций, примыкающих друг к другу, рис. 3.42.

Секции могут иметь равные или разные углы. Принцип действия каждой секции аналогичен односекционному экрану. По аналогичному принципу выполнен экран РПА-2П (см. рис. 3.33), но он более удобен конструктивно, так как его две прямоугольные секции соединены катетами, а не вершинами. При правильном выборе δ такой экран позволяет «размазать» боковые лепестки в более широком секторе углов, но на более низком уровне.

Гребенчатые полуволновые фланцы отличаются от всех известных расфазированных конструкций минимальными габаритами. Наиболее глубокое подавление достигается при их установке по краю плоского фланца шириной $1\div 3\lambda$, рис. 3.43. Поле, возбуждающее гребенчатую структуру, сначала ослабляется за счет дифракции на клине плоского фланца, а затем за счет его расфазировки гребенчатой структурой.

Гребенчатые фланцы можно использовать в антеннах с произвольным соотношением углов φ_0 и ψ_0 . Но в каждом конкретном случае необходимо подбирать наклон гребней и ширину фланца таким образом, чтобы обеспечить максимальное ослабление бокового излучения в заданном секторе углов. Максимальное подавление бокового излучения в РПА с $\psi_0 = \varphi_0 = 25^\circ$ наблюдается, например (при равной $\lambda/2$ высоте гребней и ширине плоского фланца, перпендикулярного боковой стенке), когда угол между плоскостью гребней и плоским фланцем равен $\sim 55^\circ$.

Уровень подавления бокового излучения от угла наклона прямоугольных гребней зависит весьма сильно, рис. 3.44, а достаточно глубокое подавление сохраняется в сравнительно небольшой полосе частот. Это связа-

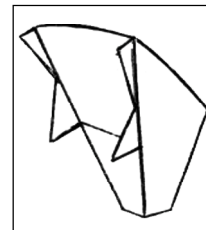


Рис. 3.42

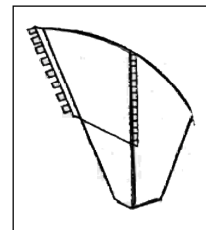


Рис. 3.43

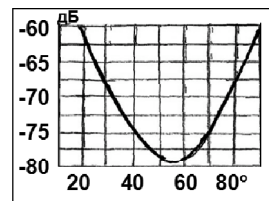


Рис. 3.44

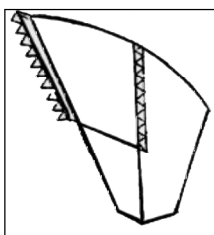


Рис. 3.45

но с отступлением размера гребней (при изменении длины волны) от оптимальной величины, равной $\lambda/2$.

Зубчатые фланцы, рис. 3.45, выполненные в виде равнобедренных треугольников высотой $1 \div 3\lambda$ и шириной (у основания), равной λ , работают (по сравнению с гребенчатыми) в значительно более широкой полосе частот, но эффективность зубчатого фланца высотой λ меньше эффективности гребенчатого фланца, имеющего высоту всего $\lambda/2$, а оптимальная высота зубцов составляет порядка 3λ .

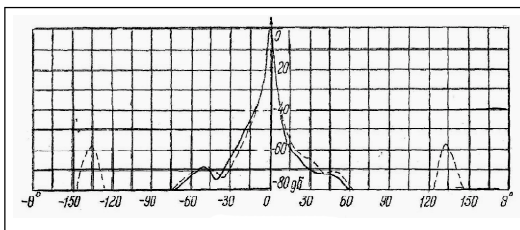


Рис. 3.46

На рис. 3.46 показаны огибающие ДН РПА ($2\varphi_0 = 49^\circ$, $2\psi = 22^\circ$) без щитков (пунктир) и с зубчатыми щитками (сплошная линия), которые уменьшают увеличенные лепестки до уровня ниже -80 дБ.

В вертикальной плоскости при вертикальной поляризации повышенный уровень бокового излучения наблюдается в верхнем и

заднем полупространстве (в секторе углов, определяемом прямым переизлучением рупора и дифракцией на верхней кромке).

Это излучение отражается на защитном действии антенны, требования к которому для антенн РРЛ велики. Кроме того, оно может вносить помехи в спутниковые системы связи, если антенна эксплуатируется вблизи экватора.

Установка по верхней кромке зеркала гребенчатых полуволновых или зубчатых фланцев, рис. 3.47, аналогичных рассмотренным выше для горизонтальной плоскости, является весьма простым способом подавления дифракционных лепестков, создаваемых верхней кромкой. Эти фланцы, как и боковые, следует устанавливать по краю верхнего плоского фланца, и подбирать наиболее оптимальные относительно него углы наклона.

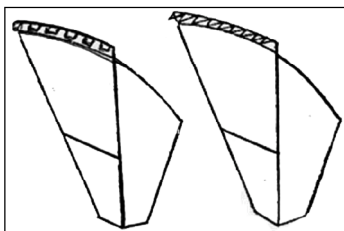


Рис. 3.47

На рис. 3.48 показаны огибающие ДН антенны ($2\varphi_0 = 49^\circ$, $2\psi_0 \approx 22^\circ$) в вертикальной плоскости при вертикальной поляризации с гребенчатыми фланцами (сплошная линия) и без них (пунктир).

Подавление бокового излучения получается весьма значительным. Но влияние этих фланцев распространяется только на дифракционные лепестки от верхней кромки зеркала, а переливный лепесток не уменьшается.

Выполнение части передней стенки рупора в виде импедансной структуры (гладкой диэлектрической пластины или металлической с четвертьволновыми канавками), «отжимающей» энергию в сторону зеркала, при правильном выборе размера такой структуры, является очень эффективным способом подавления излучения РПА в

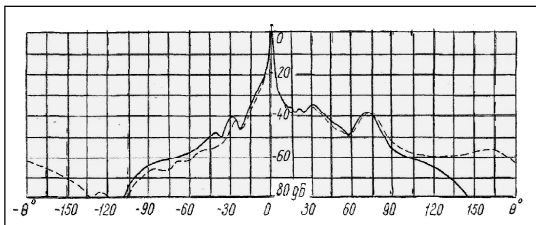


Рис. 3.48

верхнем и заднем полупространстве. Такая структура уменьшает не только дифракционное излучение, но и переливный лепесток.

Импедансная структура, чтобы не ухудшить согласования антенны с питающим трактом, должна плавно сопрягаться со стенкой рупора со стороны его

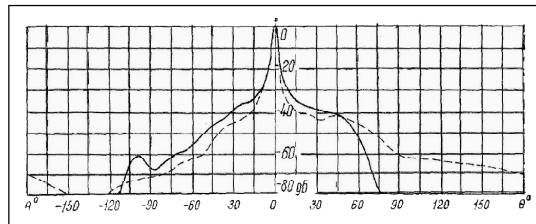


Рис. 3.49

горла. Сектор и величина подавления бокового излучения зависят от размера структуры и ее расположения внутри рупора. При ее расположении вблизи раскрытия сектор и глубина подавления незначительны, но по мере смещения к горлу рупора (или увеличения ширины) сектор подавления расширяется, но возникают и постепенно увеличиваются потери усиления. Можно, однако, подобрать такое расположение и такую ширину, когда сектор и глубина подавления будут значительными, а усиление антенны останется практически неизменным или даже немного возрастет.

На рис. 3.49 приведены огибающие ДН РПА ($2\psi_0 = 2\varphi_0 = 50^\circ$) в вертикальной плоскости при вертикальной поляризации, где уровень переливного и дифракционного лепестков наиболее высок.

Сплошной линией дана ДН антенны с импедансной структурой в виде четвертьволновых канавок, размещенной в верхней части рупора (примерно до середины высоты его передней стенки), а пунктиром — без нее.

Наличие канавок приводит к уменьшению излучения (более чем на 10 — 15 дБ) в большей части верхнего и заднего полупространства. Некоторое увеличение уровня бокового излучения в секторе углов, соответствующем дифракционному полю от нижней кромки раскрытия антенны, можно объяснить увеличением амплитуды поля, облучающего эту кромку, которое явилось следствием перераспределения энергии в раскрытии антенны. При замене канавок диэлектрической пластиной, подобранной соответствующим образом, достигается аналогичный эффект.

Использование поглощающих материалов — нанесение их на поверхность рассмотренных выше экранов (или выполнение из поглотителя их самих) дополнительно увеличивает помехозащищенность антенны.

Внимание! При использовании всех рассмотренных выше экранов необходимо обеспечить очень плотное их прилегание к телу антенны. Щели и зазоры недопустимы, так как при их наличии вместо улучшения помехозащищенности можно получить даже ухудшение.

3.4.4. Разноугольная пирамидальная РПА

С развитием сетей РРЛ и увеличением дальности пролетов требуются антенны с повышенным (по сравнению с типовой РПА) коэффициентом усиления. Однако увеличение усиления зеркальных антенн напрямую связано с увеличением их размеров, которые ограничиваются возможностью ее транспортировки, включая и транспортировку железнодорожным транспортом. Так как относительные размеры РПА (при равном КУ) намного больше размеров осесимметричной антенны, то ее транспортировка превращается в проблему при гораздо меньших КУ.

Кроме того, пропорциональное увеличение размера раскрытия в обеих плоскостях приводит к соответствующему сужению ширины главного лепестка



Рис. 3.50

также в обеих плоскостях. Однако сужение главного лепестка в вертикальной плоскости до $2\theta_{0,5} < 1^\circ$ градуса для антенн РРЛ нежелательно, так как может привести к неустойчивости связи из-за рефракции. Увеличивать площадь раскрыва антенн РРЛ с большим КУ желательно поэтому за счет увеличения размера апертуры только в горизонтальной плоскости. Это, к тому же, приводит и к снижению в этой плоскости (основной для антенн РРЛ) уровня бокового излучения.

Разноугольная РПА [4], [64], рис. 3.50, позволяет решить указанные выше проблемы. Эта антенна с увеличенной (по сравнению с типовой РПА) площадью раскрыва имеет и увеличенный примерно на 3 дБ КУ, который в диапазоне 3,4 — 3,9 ГГц составляет порядка 42÷43 дБ. Увеличение площади раскрыва данной антенны обеспечивается благодаря разным углам раствора за счет увеличения размера ее апертуры в горизонтальной плоскости.

Размеры антенны: $2\psi_0 = 22,10^\circ$, $2\varphi_0 = 49^\circ$, $x_1 \approx 5,47$ м, $x_2 \approx 8,08$ м, $F \approx 3,326$ м, $S \approx 14,65$ м².

Размеры и форма раскрыва антенны выбраны таким образом, чтобы иметь возможность без разборки параболического отражателя перевозить антенну по железной дороге. Для этого достаточно разъединить параболическое зеркало (со «щеками») и облучающий рупор. Размещение зеркала и рупора на железнодорожной платформе показано на рис. 3.51 (а и б, соответственно).

Диаграммы направленности модели антенны [4], [64], выполненной с коэффициентом моделирования 1:10, вблизи главного направления показаны на рис. 3.52 — 3.54 (ДН при поперечной поляризации даны слева, при продольной — справа, расчетные — сплошной линией, экспериментальные — пунктиром).

Главные лепестки ДН в горизонтальной плоскости (см. рис. 3.52) на обеих поляризациях значительно уже, чем в вертикальной (см. рис. 3.53), где они примерно идентичны ДН в этой же плоскости типовой РПА, а главные лепестки не превышают допустимой ширины. Однако присущая РПА (с обычным РР в качестве облучателя) разница по ширине главного лепестка и уровню первых боковых лепестков по поляризациям, сохраняется.

На 3.54 показаны кросс-поляризационные ДН в поперечной плоскости вблизи направления главного излучения.

Уровень максимумов кроссполяризации этой антенны примерно такой же, как и типовой РПА, он составляет -(16 — 18 дБ).

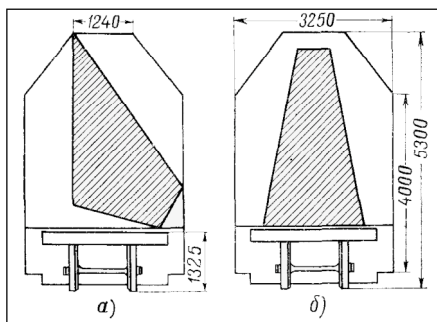


Рис. 3.51

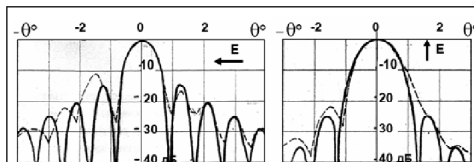


Рис. 3.52

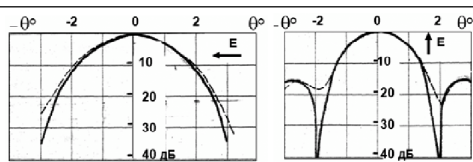


Рис. 3.53

Напомним, что в продольной плоскости РПА кросс-поляризационных максимумов не имеет.

На рис. 3.55, 3.56 и 3.57 приведены круговые ДН антенны без щитков (пунктир) и с полуволновыми гребенчатыми щитками (сплошная линия).

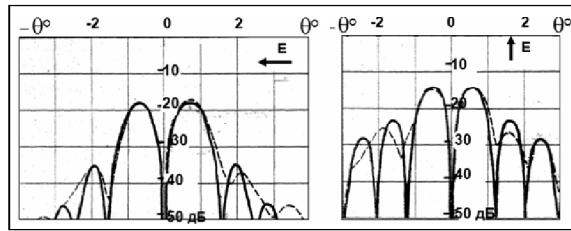


Рис. 3.54

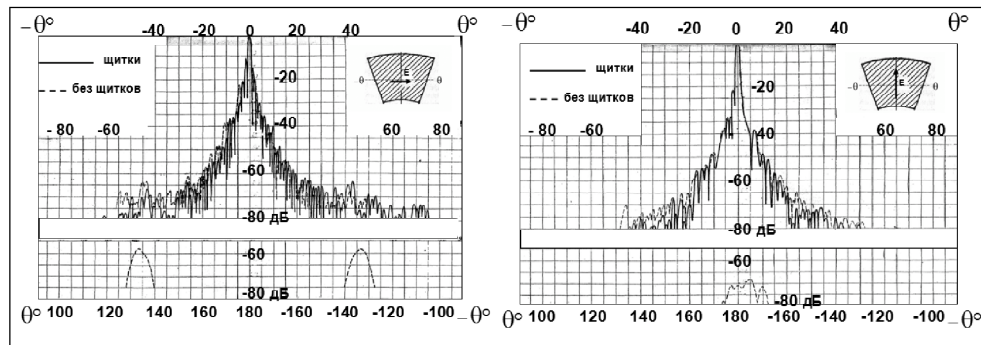


Рис. 3.55

В поперечной плоскости (см. рис. 3.55), где уровень бокового излучения наиболее низок, повышенные дифракционные лепестки наблюдаются в заднем полупространстве. Благодаря гребенчатым щиткам, установленным на боковых кромках антенны и верхней, их удалось снизить до уровня ниже -80 дБ (ниже уровня шумов измерительной установки). В результате в секторе углов примерно $180^\circ \pm 120^\circ$ на горизонтальной поляризации и $180^\circ \pm 130^\circ$ — на вертикальной уровень дальнего бокового излучения этой антенны более чем на 37 дБ ниже уровня изотропного излучения.

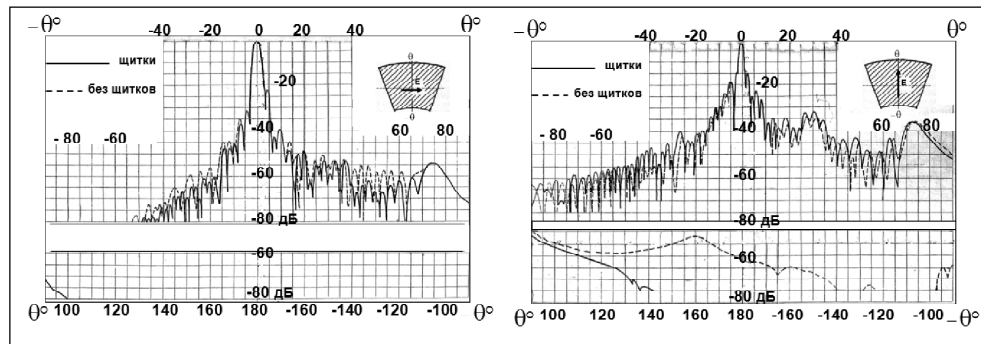


Рис. 3.56

В продольной плоскости (см. рис. 3.56), где уровень дальнего излучения, определяемый переливным лепестком рупора и дифракцией на верхней кромке антенны, наиболее высок (особенно при продольной поляризации), его в большей части заднего полупространства удалось уменьшить до уровня ниже

–75 дБ (ниже уровня шумов измерительной установки. В результате и в этой плоскости защитное действие антенны значительно улучшилось и стало более чем на 32 дБ ниже уровня изотропного излучения.

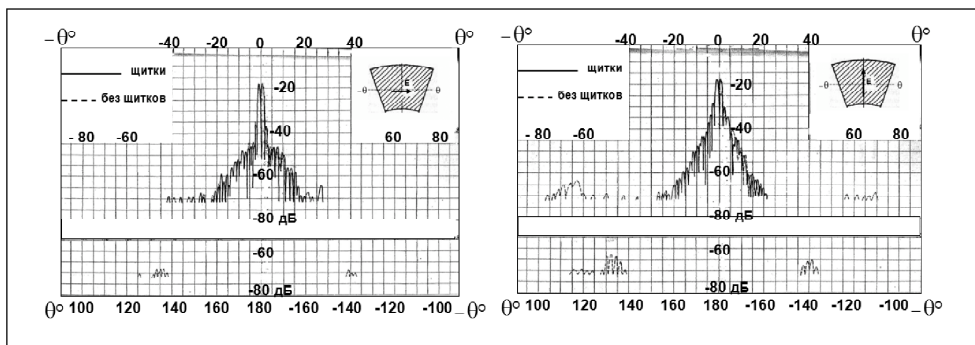


Рис. 3.57

Кросс-поляризационные ДН (см. рис. 3.57) в поперечной плоскости, которые и без щитков имеют низкий уровень дальнего излучения, благодаря щиткам также улучшились и уровень их дальнего бокового излучения стал ниже уровня шумов измерительной установки (ниже -70 дБ).

Коэффициент усиления (и КИП), измеренный методом сравнения с эталонной антенной, в полосе рабочего диапазона (3,4 — 3,9 ГГц) изменяется примерно от 42 до 43 дБ (КИП — 0,64 — 0,70), что несколько ниже ожидаемых расчетных значений. Одной из возможных причин несовпадения является недостаточно хорошая точность изготовления модели антенны.

Коэффициент отражения от входа рупора (при наличии специально рассчитанного согласующего перехода и отсутствии крышки, закрывающей раскрыв антенны) не превышает 1,25 %. Измерения проводились на реальных волнах с применением эквивалента антенны.

Приведенные выше параметры получены на антенне без укрытия, которое, если его выполнить по аналогии с типовой антенной, значительно ухудшит параметры и этой антенны. Однако применение для укрытия вновь созданных полимерных материалов способно решить эту проблему практически без ухудшения основных параметров антенны.

Преимущества разноугольной РПА, раскрыв которой вытянут в поперечной плоскости (по сравнению с равноугольной и при прочих равных условиях):

Увеличивается помехозащищенность антенны в горизонтальной плоскости, где требования к ней для антенн РРЛ наиболее высоки.

При увеличении площади раскрыва примерно в два раза его размер в вертикальной плоскости остается почти прежним, что позволяет увеличить усиление антенны примерно на 3 дБ без сужения главного лепестка ДН в этой плоскости, что является положительным фактором с точки зрения устойчивости связи.

Антенна, несмотря на большие размеры, может транспортироваться по железной дороге без разборки зеркала.

Несмотря на то, что в разноугольной РПА были устранены некоторые недостатки, присущие данной схеме, два ее весьма существенных недостатка все

же сохранились. К ним относится зависимость ширины главного лепестка и уровня первых боковых лепестков от поляризации (при использовании неоптимизированного рупора), а также очень большие габариты антенны. В следующих разделах будут рассмотрены возможные пути и их устранения.

3.4.5. РПА с модифицированным рупором

Жесткое схемно-конструктивное соединение рупора с отражающим зеркалом, характерное для РПА, затрудняет, как уже было отмечено, улучшение параметров РПА путем оптимизации параметров ее облучателя, представляющего собой, чаще всего, обычный РР с разной на разных поляризациях шириной главного лепестка. Применение конического РР позволяет, правда, несколько снизить уровень первых боковых лепестков, но разная ширина главного лепестка на разных поляризациях все равно сохраняется.

Одним из исполнений РПА, позволяющим обеспечить независимость ширины главного лепестка и уровня первых боковых лепестков от поляризации, а заодно улучшить и помехозащищенность, является РПА, в которой использован рупор со ступенькой [9], рис. 3.58.

Эта РПА содержит отражающее зеркало 1 и облучающий рупор, выполненный из двух последовательно расположенных рупоров 2 и 3. Фазовый центр облучающего рупора совмещен с фокусом отражающего зеркала. Раскрыв рупора 2, примыкающего к питающему волноводу, меньше основания рупора 3, а угол раствора рупора 2 меньше или равен углу раствора рупора 3. При соответствующей разности и величине углов раствора двух секций рупора он представляет собой РРИ со ступенькой в месте соединения малого рупора с основным, а при равенстве углов — РР со ступенькой. При соответствующем исполнении рупора уровень облучения краевой зоны (на рис. 3.58 она заштрихована) значительно снижается.

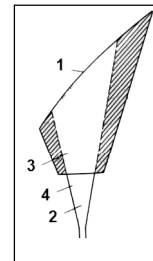


Рис. 3.58

Рупор РПА, как пирамидальной, так и конической, можно выполнить и по обычной схеме РРИ (без ступеньки), рис. 3.59, состоящего, как обычно, из основного и малого рупора, геометрические размеры которых оптимизированы (см. раздел 1.4.2). При этом можно сохранить и ступеньку, перенеся ее в место соединения основного рупора с зеркалом (в этом случае ее целесообразно покрыть поглотителем).

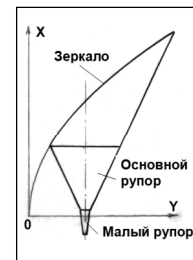


Рис. 3.59

Рассмотренные выше схемы РПА не исследовались, но совершенно очевидно, что такое решение позволяет манипулировать конструкцией и направленными свойствами облучателя, оптимизируя, в конечном итоге, электрические параметры антенны в целом, включая не только дополнительное улучшение ее помехозащищенности, но и создание осесимметричного главного лепестка, и уменьшение уровня первых боковых лепестков.

Предложенные схемы не устраняют, однако, основного конструктивного недостатка РПА — ее очень больших продольных размеров. Этот недостаток устраняется, однако, при переходе к схемам АВО, в которых облучатель «оторван» от зеркала и поэтому возможности его оптимизации значительно расширены.

3.5. Антенны с вынесенным облучателем (АВО)

3.5.1. Общие сведения

Несмотря на то, что РПА имеют хорошие электрические параметры, особенно по диапазонности и помехозащищенности, количество выпускаемых типоразмеров этих антенн (из-за их больших габаритов, массы и стоимости) весьма ограничено и явно недостаточно для оптимального проектирования сети радиорелейных и, тем более, спутниковых линий. Поэтому было разработано множество антенн других типов, в первую очередь, осесимметричных, а реализация достоинств РПА при отсутствии их недостатков стала возможной в антеннах с вынесенным облучателем (АВО).

Но ничего не дается бесплатно, за все нужно платить. Осесимметричные антенны и АВО за улучшение своих параметров расплачиваются более сложными облучателями, а также увеличением габаритов, массы и стоимости, хотя и не столь значительным, как РПА. АВО долгое время значительно уступали РПА по своим основным параметрам, включая помехозащищенность. Но в настоящее время эти антенны (при соответствующем исполнении) способны превзойти РПА не только по конструктивным, но и по электрическим показателям. Это стало возможным благодаря тому, что облучатель АВО не составляет с зеркалом единого схемно-конструктивного блока, и это позволяет использовать в этой схеме самые разные облучатели с оптимизированными ДН, а также свободно варьировать размером, формой и конструкцией ее защитных экранов.

Схема АВО (без защитного экрана) показана на рис. 3.60.

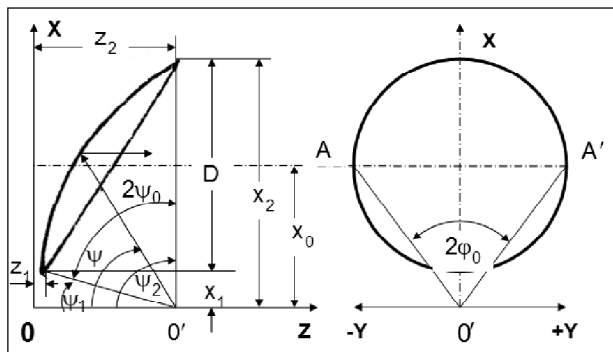


Рис. 3.60

Отражающее зеркало АВО с круглым раскрывом, как уже было сказано, представляет собой вырезку части параболоида вращения цилиндром. Ось этого цилиндра параллельна фокальной оси исходного параболоида и удалена от нее на некоторое расстояние (x_0).

Основные обозначения:

$D=2R$ — диаметр раскрыва антенны; $F=O'O'$ — фокусное

расстояние; x_1 — расстояние от фокальной оси (OZ) до ближней (нижней) кромки зеркала; x_0 — расстояние от фокальной оси до центра раскрыва антенны; x_2 — расстояние от фокальной оси до дальней (верхней) кромки зеркала; ψ_1 — угол между фокальной осью и направлением на ближнюю (нижнюю) кромку зеркала; ψ_2 — угол между фокальной осью и направлением на дальнюю (верхнюю) кромку зеркала (половина угла раствора исходного параболоида); $2\psi_0$ — угол раствора зеркала в продольной плоскости (плоскости симметрии XOZ); $2\phi_0$ — угол раствора зеркала в поперечной плоскости антенны (плоскости $AA'O'$, проходящей через фокус зеркала и поперечную ось симметрии раскрыва).

Здесь и дальше, говоря об антеннах типа АВО, плоскость XOZ , совпадающую с плоскостью симметрии антенны, будем (по аналогии с РПА) называть продольной или вертикальной плоскостью. Плоскость $AA'O'$, проходящую через

поперечную ось симметрии раскрыва и фокус зеркала, — поперечной плоскостью антенны. Плоскость, проходящую через поперечную ось симметрии раскрыва параллельно фокальной оси — поперечной плоскостью раскрыва, либо просто поперечной или горизонтальной плоскостью.

Расстояние x_0 , в общем случае, может быть равно, меньше или больше (как в рассматриваемом и большинстве других случаев), радиуса цилиндра — радиуса раскрыва зеркала — R и определяет вынос облучателя из центра зеркала. При $x_0 > R$ можно полностью исключить затенение зеркала облучателем, но это невозможно сделать при $x_0 \leq R$. С уменьшением x_0 (при прочих равных условиях) уменьшается глубина зеркала, а с его увеличением глубина зеркала, наоборот, увеличивается, увеличивается и угол ψ_2 , что ведет к повышению максимумов кроссполяризации. Поэтому наиболее оптимальный вариант следует выбирать, исходя из конкретных требований, предъявляемых к антенне.

Основные параметры: рабочий диапазон, эффективность, согласование, уровень бокового излучения и защитное действие однозеркальной АВО без экрана практически полностью определяются характеристиками облучателя.

Идеальная форма ДН облучателя АВО, позволяющего получить в раскрыве неосесимметричной антенны распределение амплитуд поля, близкое к осесимметричному и равномерному, а также исключить утечку энергии за края зеркала показана на рис. 3.61 (а — для поперечной плоскости; б — для продольной плоскости, плоскости симметрии).

Необходимая величина перепада энергии между центром и краями зеркала зависит от величины углов φ_0 и ψ_0 , возрастающая по мере их увеличения. Идеальная ДН облучателя практически недостижима, но к ней следует стремиться, если необходимо обеспечить высокую эффективность антенны и низкий уровень переливных лепестков. Уровень первых и ближних (апертурных) лепестков при такой форме ДН облучателя будет, однако, весьма высок, что не всегда допустимо. Поэтому уровень облучения кромки зеркала выбирают, обычно, в пределах $-(10 \div 12)$ дБ, что соответствует наиболее оптимальному компромиссному решению.

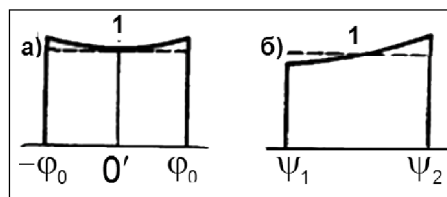


Рис. 3.61

Известно много типов облучателей зеркальных антенн, форма ДН которых приближается к ДН, которая оптимальна для поперечной плоскости (см. рис. 3.61а). Но облучателей, имеющих в другой, продольной, плоскости антенны ДН, аналогичную представленной на рис. 3.61б, очень мало. Некоторые из них, описанные в первой главе, использованы в рассмотренных ниже однозеркальных АВО, предназначенных для работы на РРЛ и на земных станциях спутниковых систем.

3.5.2. АВО с улучшенными параметрами

Улучшение параметров рассмотренных ниже АВО было достигнуто за счет использования облучателей, оптимизированных специально для данной схемы антенны и применения защитных экранов разной конфигурации. И во всех этих

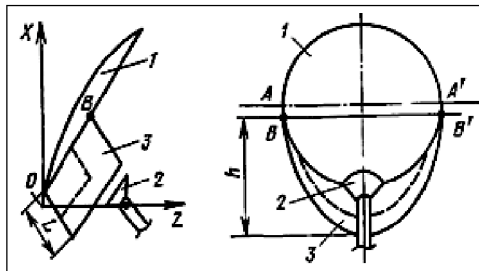


Рис. 3.62

наиболее простую, но не самую оптимальную форму. Более оптимальным является экран с криволинейными кромками, который использован в АНК-1,5 (см. раздел 3.6.3).

Зеркало антенны: параболическое с $F/\lambda = 15,32$, $D/\lambda = 31$, $H/\lambda = 18,7$, $\psi_1 \approx 12,67^\circ$, $\psi_2 = 96^\circ$, $2\psi_0 = \psi_2 - \psi_1 \approx 83,3^\circ$.

Облучатель представляет собой РРИПОКС (см. раздел 1.6.2), размеры которого оптимизированы.

Диаграммы направленности облучателя в поперечной плоскости (а) и продольной (б) приведены на рис. 3.63, при этом $\psi' = 0$ примерно соответствует направлению вдоль фокальной оси.

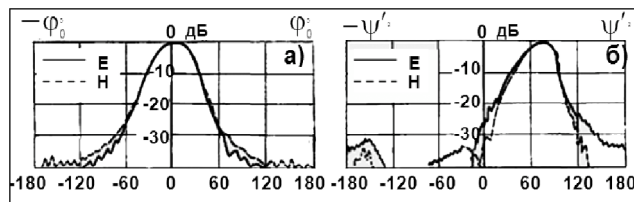


Рис. 3.63

Данный облучатель имеет низкий уровень бокового излучения. Его главный лепесток (в рабочем секторе углов) на обеих поляризациях практически идентичен и близок к оптимальному, как в поперечной, так и в про-

дольной плоскости. При установке этого рупора относительно зеркала в оптимальное (по эффективности) положение уровень облучения кромок зеркала в поперечной плоскости равен $\sim -(10 \div 12)$ дБ, а перепад уровней в направлении ближней ($\psi = \psi_1 = 12^\circ 40'$) и дальней ($\psi = \psi_2 = 96^\circ$) кромок составляет $\sim -(8 \div 10)$ дБ. Это почти компенсирует разницу в затухании, возникающую из-за разных до них расстояний. Поэтому и ближняя, и дальняя кромка зеркала облучается примерно одним и тем же уровнем, что приводит к выравниванию асимметрии в распределении амплитуды поля в продольной плоскости раскрыва антенны.

Защитный экран (см. рис. 3.62) выполнен таким образом, что его образующая в плоскости XOZ составляет с осью OX угол меньше 30° , а в точках BB' — 90° с плоскостью, проходящей через кромки зеркала.

Такая геометрия при сравнительно малых размерах экрана позволяет значительно уменьшить уровень бокового излучения антенны в заднем полупространстве продольной (для РРЛ — горизонтальной) плоскости и практически исключает скопление осадков на его поверхности. Размер экрана зависит от предъявляемых к антенне требований по защитному действию. Здесь размеры малого и большого экрана соответственно равны: $L_3/\lambda \approx 6$, $h_3/\lambda \approx 10$ и $L_3/\lambda \approx 10$, $h_3/\lambda \approx 23$.

антеннах в качестве облучателей использованы различные модификации РРИ.

АВО с защитным экраном [21], рис. 3.62, состоит из отражающего зеркала 1, облучателя 2 и защитного экрана 3. Экран, в принципе, может иметь разную конфигурацию. В данной антенне он выполнен в двух вариантах: большой (сплошная линия) и малый (пунктир). Он имеет

Коэффициент усиления антенны ($D/\lambda = 31$), измеренный на верхней, средней и нижней частоте рабочего диапазона, крайние частоты которого отличаются в 1,1 раза, составляет 38,4; 38,1 и 37,5 дБ, что соответствует КИП 0,68; 0,69 и 0,68, т.е. в пределах рабочего диапазона эффективность антенны сохраняется почти неизменной.

ДН антенны в горизонтальной плоскости на средней волне рабочего диапазона до уровня -60 дБ при горизонтальной (сплошная линия) и вертикальной (пунктир) поляризации показаны на рис. 3.64 — 3.66.

В верхней части всех этих рисунков приведены в увеличенном масштабе главные лепестки и ДН в переднем полупространстве, в секторе углов $\theta = \pm(0^\circ \div 90^\circ)$, а в нижней — ДН в заднем полупространстве, в секторе углов $\theta = \pm(90^\circ \div 180^\circ)$. Кроме того, на рис. 3.64, 3.65 и 3.67 штрих-пунктирной линией 1 нанесена действовавшая во время разработки этой антенны ДН МСЭ (для ближнего бокового излучения: $G(\theta) = 52 - 10\log(D/\lambda) - 25\log\theta$, для дальнего: $G(\theta) = 0$, пересчитанная по (3.14) относительно максимального коэффициента усиления антенны.

Уровень бокового излучения АВО без экрана (см. рис. 3.64) в секторе ближнего бокового излучения много ниже ДН МСЭ того времени, а дальнего — ниже уровня изотропного излучения.

ДН антенны без экрана, включая первые боковые лепестки, удовлетворяют и более поздним ДН МСЭ: (3.4) и (3.11), а с небольшим превышением (на 2 — 3 дБ), причем только вблизи заднего излучения — универсальным (3.15) — кривая 2. Защитное действие АВО примерно того же порядка, что и защитное действие осесимметричной антенны с углом раствора, равным углу раствора ее исходного параболоида ($2\psi_2 \approx 192^\circ$), т.е. значительно более глубокого, чем зеркало АВО, имеющей угол раствора $2\psi_0 \approx 83,3^\circ$.

Уровень бокового излучения АВО с малым экраном, рис. 3.65, много ниже уровня старых ДН МСЭ (кривая 1) в пределах всего кругового сектора горизонтальной плоскости, включая и заднее полупространство. Эти ДН удовлетворяют и универсальной (кривая 2) ДН МСЭ (3.15), причем в секторе углов $\pm(36^\circ \leq \theta \leq 180^\circ)$ с запасом, равным примерно 10 дБ.

Экран уменьшает уровень дальнего бокового излучения в секторе углов $\pm(30^\circ \div 180^\circ)$, включая заднее полупространство, где у антенны без экрана он наиболее высок) примерно до уровня -58 дБ, т.е. на 20 дБ ниже изотропного. Антенна с таким уровнем бокового излучения может быть отнесена (по международной терминологии) к классу

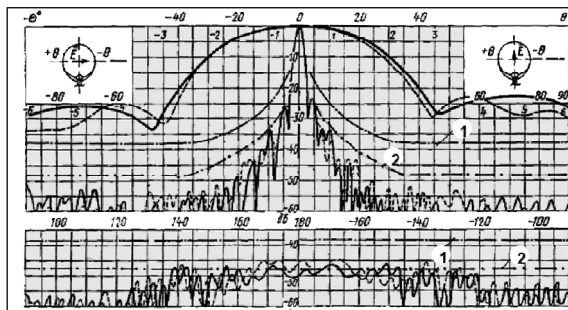


Рис. 3.64

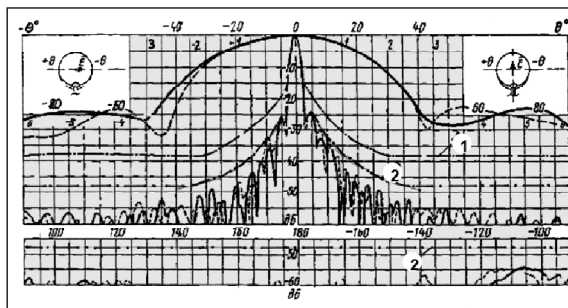


Рис. 3.65

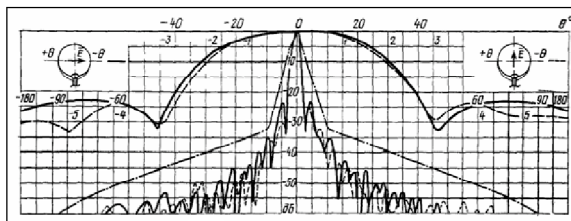


Рис. 3.66

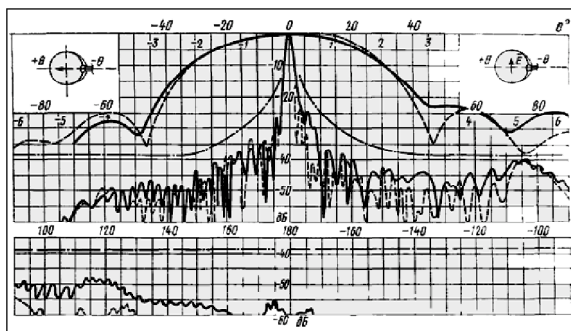


Рис. 3.67

высококачественных антенн, несмотря на то, что она имеет сравнительно небольшой относительный размер ($D/\lambda = 31$).

Уровень бокового излучения АВО с большим экраном, рис. 3.66, в секторе углов $\pm(65^\circ \div 180^\circ)$ ниже уровня шумов измерительной установки (ниже -60 дБ).

ДН антенны с большим экраном удовлетворяют не только всем приведенным выше ДН МСЭ, включая универсальную (3.15). В этом случае в области дальних и задних лепестков запас еще больше, чем у антенны с малым экраном. Кроме того, эти ДН много ниже и гарантированного уровня бокового излучения конической РПА (штрих-пунктир), имеющей

такой же коэффициент усиления.

ДН антенны в вертикальной плоскости, измеренные на обеих поляризациях (пл. Е — сплошная линия, пл. Н — пунктир) при наличии большого экрана, показаны на рис. 3.67. Большой экран уменьшает уровень дальнего бокового излучения АВО в пл. Е. почти до уровня его в пл. Н. Антенна с этим экраном и в вертикальной плоскости имеет уровень бокового излучения много ниже старых ДН МСЭ (штрих-пунктир).

Кроме того (за исключением небольшого сектора углов в районе 75 градусов) ДН антенны удовлетворяют и универсальным ДН МСЭ (3.15), причем в большей части заднего полупространства с запасом примерно в 10 дБ. Уровень дифракционных лепестков в этой плоскости можно дополнительно уменьшить за счет использования зубчатого экрана, установленного по верхней кромке антенны (см. раздел 3.4.3).

Кроссполяризация АВО сравнима с РПА, имеющей примерно тот же угол раствора исходного параболоида.

Максимумы кроссполяризации данной антенны на линейной поляризации не превышают -17 дБ, а минимум в направлении главного излучения составляет ~ -50 дБ, что не противоречит соответствующим значениям, заложенным в универсальную ДН (3.16), а на круговой поляризации, как уже было сказано, максимумы кроссполяризации вообще отсутствуют. Уровень бокового кроссполяризационного излучения на несколько дБ ниже основного.

Главный и первые боковые лепестки антенны (показанные на приведенных выше рисунках в увеличенном масштабе) на обеих поляризациях и в обеих плоскостях, в отличие от РПА с обычным РР, практически идентичны.

Ширина главного лепестка в разных плоскостях и на разных поляризациях колеблется в пределах $2^\circ 20' \pm 5'$, т. е. он практически осесимметричен, а уровень первых боковых лепестков колеблется в пределах $-(23 \div 25)$ дБ.

Коэффициент отражения от входа облучателя, который в этой антенне фактически и определяет ее согласование с питающим трактом (влияние поля, отраженного от зеркала, в данной схеме практически отсутствует), в рабочем диапазоне не превышает 2 % ($K_{CB} < 1,04$).

Защита антенны от атмосферных осадков осуществляется за счет ее схемно-конструктивного решения, благодаря которому в данной антенне можно герметизировать лишь облучатель. Крышка, закрывающая раскрыв рупора, составляет с горизонталью угол порядка 60° , что препятствует скоплению на ней даже твердых осадков. Достаточно «прозрачными» для осадков является и основание антенны. Поэтому в большинстве климатических районов страны эту антенну можно эксплуатировать без укрытия ее в целом.

При необходимости антенна может быть закрыта простым (негерметичным) чехлом из тонкой радиопрозрачной пленки, не ухудшающей электрические параметры антенны, так как в случае повреждения пленки риск невелик — антенна все равно останется работоспособной.

Сравнение АВО с конической РПА [21], имеющей примерно равный относительный диаметр раскрыва, показало, что она (при использовании в качестве облучателя РРИПОКС) по своим электрическим параметрам не только соизмерима с РПА (с обычным РР), но даже превосходит ее по большинству из них, включая эффективность, уровень первых боковых лепестков и КСВ. Указанные параметры у рассматриваемой РПА соответственно равны: 0,55, -18 дБ и 1,06. По уровню максимумов кроссполяризации эти антенны соизмеримы.

Таким образом, данная АВО (с оптимизированным облучателем в виде РРИПОКС), имеющая значительно меньшие габариты и материалоемкость, может с успехом заменить РПА в тех случаях, когда не требуется ее присоединения к жесткому вертикальному волноводному тракту.

АВО с облучателем, имеющим двускатный поглощающий фланец (см. раздел 1.4.5), который позволяет дополнительно улучшить помехозащищенность антенны, показана на рис. 3.68 [54].

При установке облучателя с двускатным поглощающим фланцем таким образом, что его длинные образующие лежат в вертикальной плоскости, не только дополнительно увеличивается защитное действие антенны даже при отсутствии экрана, но и уменьшается, благодаря двускатной крышке, вероятность скопления на ней осадков любого вида (воды, снега, льда).

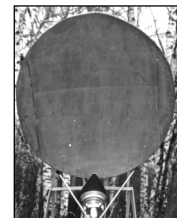


Рис. 3.68

3.5.3. Широкодиапазонная АВО с вертикальным выходом облучателя

Широкодиапазонная АВО с вертикальным выходом облучателя [30] выполнена на базе использования одного из модификаций РРИ. Она без замены и перестройки облучателя работает почти в 4-х кратной полосе частот.

Конструкция антенны, рис. 3.69, несколько напоминает РПА, но ее вертикальный размер сильно уменьшен. Она состоит из параболического зеркала 1, рупорного облучателя 2, экрана 3 и рамы 4.

Зеркало имеет круглый раскрыв и представляет собой вырезку из параболоида вращения цилиндром диаметра D .

Размеры зеркала (см. рис. 3.60): $D = 2R = 1,5$ м, $F = 0,575$ м, $x_1 = 0,3$ м; $x_0 = 1,05$ м; $x_2 = 1,8$ м, $\psi_1 \approx 29,2^\circ$; $\psi_2 \approx 114,8^\circ$, $2\psi_0 \approx 85,6^\circ$.

Облучатель, выполнен по схеме РРИПОКС (см. раздел 1.6.2).

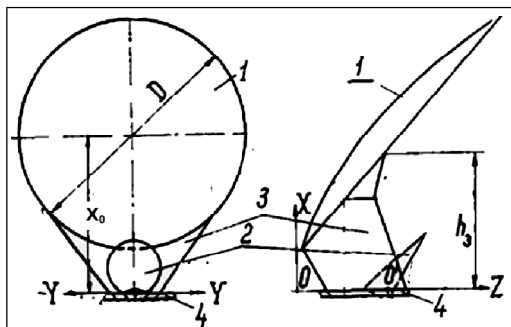


Рис. 3.69

Размеры облучателя:
 $2R_{\max} = 780$ мм; $2\alpha_2 = 90^\circ$, $2\alpha_1 = 5^\circ$,
 $\gamma_{\text{по}} = 15^\circ$; $\beta_2 = 27^\circ$; $\Delta = 87,5$ мм; диа-
 метр сечения волновода $2r = 70$ мм.

Геометрические размеры зеркала и облучателя выбраны таким образом, что при установке этого рупора в положение, близкое к оптимальному, его волноводный выход направлен вертикально вниз. Это позволяет присоединять АВО, как и РПА, к жесткому вертикальному волноводному тракту без дополнительных изгибов.

Экран, улучшающий помехозащищенность антенны, представляет собой внизу часть поверхности конуса, а сверху — цилиндра. Такой экран, незначительно увеличивая габариты антенны, существенно улучшает ее помехозащищенность и одновременно (вместе с ребрами жесткости) служит несущей конструкцией.

Снизу экран усечен плоскостью, совпадающей с плоскостью YOZ . Высота экрана $h_3 = 0,95$ м. Прямолинейные кромки экрана можно заменить криволинейными, как это было сделано в серийной антенне (см. раздел 3.6.3), что позволит исключить появление в горизонтальной плоскости увеличенных дифракционных лепестков. Подробнее о конструкции экрана сказано в [30].

Рама основания 4 выполнена в виде решетки с достаточно большими просветами, чтобы не допустить значительного скопления на ней воды, льда и снега.

Защита антенны от атмосферных осадков осуществляется, в основном, благодаря конструкции самой антенны и облучателя. Плоскость крышки облучателя за счет углов $\gamma_{\text{по}} = 15^\circ$ и $\beta_2 = 27^\circ$ составляет с горизонталью угол 42° , что препятствует скоплению на ее поверхности даже твердых осадков (льда и снега).

Поэтому во многих климатических районах эта антенна, несмотря на вертикальный волноводный выход облучателя, может, в отличие от РПА, эксплуатироваться без укрытия или с негерметичным укрытием из тонкой пленки, так как ее облучатель герметизирован отдельно и антенна в целом в герметизации не нуждается. Это является очередным, причем очень значительным, преимуществом этой антенны по сравнению с РПА.

Электрические параметры облучателя определяются его схемой и геометрическими размерами, обеспечивающими работу в очень широкой непрерывной полосе частот, перекрывающей несколько диапазонов, выделенных для РРЛ (4, 6, 8 и даже 11 ГГц). Этому способствовал и очень малый угол раствора

малого рупора.

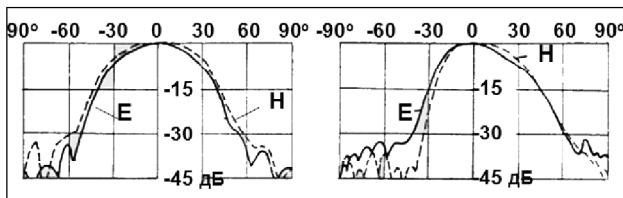


Рис. 3.70

ДН облучателя, измеренные на частоте 5,92 ГГц и на расстоянии, примерно соответствующем расстоянию от фокуса зеркала до центра его раскрытия, показаны на рис. 3.70.

В поперечной плоскости (см. рис. 3.70, слева) ДН на обеих поляризациях идентичны и симметричны. Они имеют значительную крутизну скатов главного лепестка за пределами рабочего сектора углов и низкий уровень ближнего и дальнего (он здесь не показан) бокового излучения.

В продольной плоскости (см. рис. 3.70, справа) — плоскости симметрии рупора ДН по поляризациям отличаются незначительно, главный лепесток асимметричен, что позволяет получить и в этой плоскости почти симметричное относительно центра раскрыва распределение амплитуды поля (в данном случае нулевое направление соответствует направлению оси волновода).

При использовании такого облучателя эффективность антенны значительно увеличивается, причем не только в оптимизированном диапазоне, но и в прилегающих к нему.

Однако по мере удаления от оптимизированного диапазона ДН рупора постепенно отклоняется от оптимальной. В диапазоне 4 ГГц (и ниже) она приближается к ДН обычного РР, а поэтому ширина главного лепестка в пл. Е увеличивается со всеми вытекающими последствиями (повышением облучения кромки рупора и переизлучением части энергии за пределы зеркала). В диапазоне 8 ГГц (и выше), оставаясь почти одинаковой на обеих поляризациях, главный лепесток постепенно сужается. Уровень облучения кромки рупора и зеркала при этом уменьшается, что приводит к значительному улучшению согласования и помехозащищенности антенны. Но эффективность антенны при этом падает. Это особенно заметно при отклонении рабочей частоты от оптимальной более чем в 2 раза и объясняется тем, что на этих частотах влияние основного рупора на главный лепесток ДН уже мало. Работает, в основном, лишь малый синфазный рупор, главный лепесток которого в этом диапазоне становится настолько узким, что периферия основного зеркала может облучаться даже первыми боковыми лепестками. Однако и в этом случае антенна остается вполне работоспособной и, за исключением эффективности, ее остальные параметры, включая помехозащищенность и согласование, улучшаются.

Электрические параметры антенны были исследованы (без замены и перестройки облучателя) почти в 4-х кратной полосе частот.

Коэффициент усиления (КУ) и коэффициент использования (КИП), которые практически не зависят от поляризации приведены (в зависимости от частоты) на рис. 3.71 (точками и крестиками, которые практически совпадают, показаны значения КУ на двух поляризациях).

С увеличением частоты от 3,3 ГГц до 10,5 ГГц абсолютное значение КУ плавно увеличивается, а затем начинает очень медленно уменьшаться из-за снижения КИП, который, однако, при перекрытии почти 3-х кратного диапазона (на частотах меньше 10 ГГц) сохраняется выше 0,5. И только достигая частоты 12 ГГц, что соответствует перекрытию почти 4-х кратного диапазона, падает до 0,3. Но и этот, 4-х кратный, диапазон может быть дополнительно расширен в сторону длинных волн, если нет повышенных требований к КСВ, так как со стороны нижних частот (при достаточно большой расфазировке рупора) рабочий диапазон ограничивается максимально допустимым значением КСВ.

Согласование антенны с питающим трактом, рис. 3.72, сохраняется достаточно

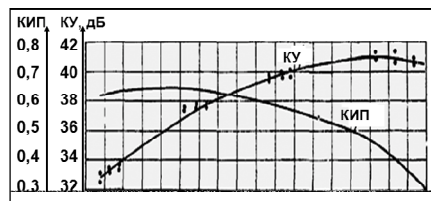


Рис. 3.71

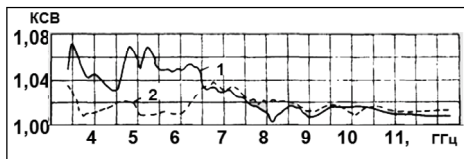


Рис. 3.72

хорошим во всем исследованном, почти 4-х кратном, диапазоне частот даже без оптимизации облучателя по согласованию. Но в длинноволновой части диапазона при поперечной поляризации (1) КСВ значительно выше, чем при продольной поляризации (2).

Увеличение КСВ при переходе к более длинным волнам происходит потому, что с уменьшением частоты главный лепесток рупора в пл. Е расширяется, а поэтому увеличивается вклад кромки основного рупора в общее отраженное поле. Различие КСВ по плоскостям объясняется тем, что при продольной поляризации повышенным уровнем облучаются те части кромки рупора, которые сильно расфазированы, что и ведет к снижению КСВ, а при поперечной поляризации сигнал, отраженный от противоположных точек кромки, расположенных симметрично, складывается в фазе и КСВ увеличивается. Кроме того, в данном исполнении антенны облучатель частично находится в зоне действия нижней части зеркала, и оно (на нижних частотах, где главный лепесток ДН облучателя в плоскости Е расширяется) также оказывает некоторое влияние на согласование. Очень низкое (1,02 и ниже) и практически независимое от поляризации значение КСВ на частотах выше 7,5 ГГц объясняется тем, что в этом случае и кромка основного рупора, и нижняя часть зеркала облучаются очень низким уровнем и практически не вносят своего вклада в отраженное поле.

Если антенна предназначена для работы в полосе одного рабочего диапазона или согласование антенны необходимо улучшить в каком-либо одном из диапазонов, то это можно сделать по методике, изложенной в разделе 1.7.

Гарантированные ДН [30], построенные как огибающие максимумом боковых лепестков нескольких экспериментальных ДН, измеренных в горизонтальной плоскости на частотах 3,65 ($D/\lambda = 18,25$) и 5,92 ГГц ($D/\lambda = 29,6$), даны на рис. 3.73, а на частотах 8,15 ($D/\lambda = 40,75$) и 11,2 ГГц ($D/\lambda = 56$) — на рис. 3.74.

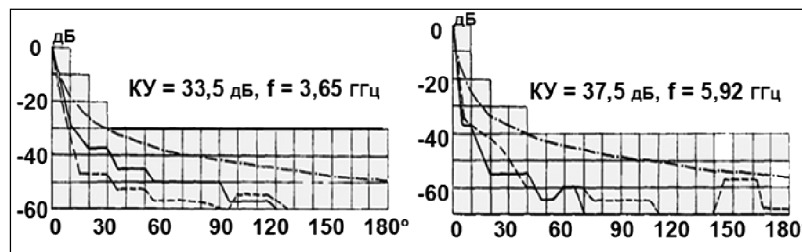


Рис. 3.73

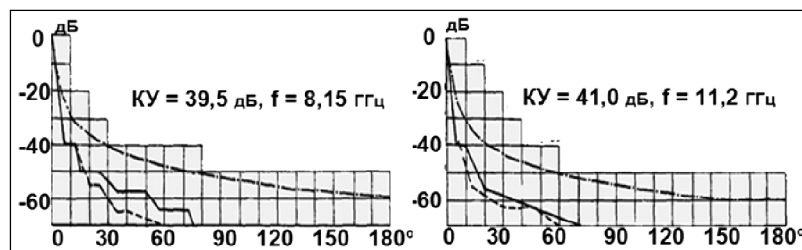


Рис. 3.74

На этих же рисунках штрихпунктирной линией показаны ДН МСЭ (действующие на момент разработки этой антенны), рассчитанные по формуле: $G(\varphi) = 52 - 10\log(D/\lambda) - 25 \log \varphi$ и пересчитанные по (3.14) относительно G_{\max} , но без ограничения каким-либо фиксированным уровнем, как это принято для большинства современных ДН МСЭ (см. раздел 3.1). Все гарантированные (и, тем более, реальные) ДН удовлетворяют не только этой ДН МСЭ, но и более поздним, включая универсальную ДН (3.15), причем при $36^\circ \leq \varphi \leq 180^\circ$ в основном с запасом более 20 дБ. С увеличением D/λ этот запас в указанном секторе углов увеличивается, увеличивается запас и при углах $\leq 36^\circ$. Реальные ДН антенны (они здесь не приведены) в секторе ближних (апертурных) лепестков практически удовлетворяют и самой строгой ДН (3.12), действительной для РПА и АВО со слабым облучением края зеркала (с малой эффективностью). И это, несмотря на то, что в диапазоне 4 и 6 ГГц данная антенна имеет высокую эффективность, причем при небольшом относительном размере зеркала.

Следует отметить, что абсолютную помехозащищенность этой антенны определить не удалось, так как рабочий диапазон измерительной установки составлял 60 дБ в диапазоне 4 ГГц и 70 дБ — в диапазонах 6, 8 и 11 ГГц, что оказалось недостаточным при измерении ДН антенны со столь высокой помехозащищенностью.

Защитное действие антенны в разных диапазонах и на разных поляризациях различно, но его гарантированное значение в секторе углов не менее $180^\circ \div 45^\circ$ составляет более 20...30 дБ.

Уровень кроссполяризации в главном направлении, несмотря на высокие максимумы, не более -40 дБ.

В таблице приведены основные параметры антенны на средних частотах трех диапазонов, выделенных для РРЛ, где КИП выше 0,5.

Частота, ГГц	D/λ	KY, дБ	КИП	ПБ, дБ	2θ _{0,5}	KП _{макс} , дБ	KCB*
3,65 Г	18,25	33,4	0,66	-17	3°28'	-13	< 1,07
В		33,3	0,65	-27	4°	-15	< 1,04
5,92 Г	29,6	37,6	0,66	-25	2°40'	-15	< 1,05
В		37,6	0,66	-24	2°40'	-14	< 1,03
8,15 Г	40,75	39,8	0,59	-30	2°2'	-17	< 1,02
В		39,4	0,53	-30	1°50'	-19	< 1,02

В таблице приняты следующие обозначения: Г и В — горизонтальная (поперечная) и вертикальная (продольная) поляризация, соответственно; KY — коэффициент усиления; КИП — коэффициент использования поверхности; ПБ — уровень первого бокового лепестка; 2θ_{0,5} ширина главного лепестка по уровню половинной мощности; KП_{макс} — уровень максимум кроссполяризации; *KCB — коэффициент стоячей волны, измеренный в пределах каждого из рабочих диапазонов, выделенных для РРЛ.

Параметры антенны в разных частотных диапазонах были измерены при использовании конических волноводных переходов от сечения волновода диаметром 70 мм к типовому (для исследуемого диапазона) сечению. Возможность совмещения нескольких частотных диапазонов в едином волноводном тракте требует дополнительной доработки и исследования.

В данной антенне не только реализованы все основные достоинства РПА, включая возможность непосредственного (без волноводного изгиба) присоединения облучателя к жесткому вертикальному волноводному тракту, но и

устранены почти все ее недостатки в части конструктивных и электрических параметров.

Исключение составляет повышенный уровень кросс-поляризационных максимумов, который в зависимости от частоты и поляризации колеблется, как и у РПА, в пределах $-(13 \div 19)$ дБ. Но так как в направлении главного излучения уровень поля при кросс-поляризации более -40 дБ, то при точной юстировке антенны, которая, как правило, имеет место всегда, этот недостаток не должен влиять на работу РРЛ, если к этому параметру не предъявляется чрезмерных требований.

Таким образом, выгодно отличающаяся от РПА небольшими габаритами, а поэтому более легкая и менее материалоемкая, чем РПА, антенна, выполненная по схеме АВО, обеспечивает без замены и перестройки облучателя соизмеримые с РПА и более высокие электрические параметры при работе в 3-х кратной полосе частот. Сохраняет она работоспособность, хотя и при меньшей эффективности, но зато при лучшем согласовании с питающим трактом и лучшей помехозащищенности, и в 4-х кратной полосе.

При наличии нескольких сменных облучателей, оптимизированных для одного или двух смежных диапазонов, можно реализовать и более высокие параметры, в частности, обеспечить в каждом из них примерно одинаковую (высокую) эффективность. Это было осуществлено на серийной антенне АНК-1,5 (см. раздел 3.6.3).

Наличие вертикального волноводного выхода (при малых габаритах и массе антенны) дает возможность использовать эту антенну со шпренгельной мачтой-волноводом типа «Шпора», в которой питающий волновод является одновременно и мачтой-опорой (см. раздел 3.6.5).

3.5.4. АВО с эллиптическим и полукруглым раскрывом

Антенна неосесимметричная с эллиптическим раскрывом (АНЭ) [54], рис. 3.75, выполнена по схеме АВО. Она представляет собой вырезку из параболоида вращения эллиптическим цилиндром с соотношением осей в вертикальной (D_B) и горизонтальной (D_r) плоскости 1:2 и фокусным расстоянием — F .

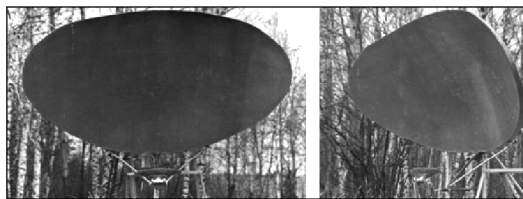


Рис. 3.75

Исследования АНЭ проводились на действующем макете в диапазоне 10,7...11,7 ГГц.

Основные размеры зеркала (рис. 3.76):

$D_r = 2$ м, $D_B = 1$ м, $F = 0,6$ м,
 $x_1 = 0,25$ м; $x_0 = 0,75$ м; $x_2 = 1,25$ м,
 $2\psi_0 \approx 69^\circ$, $2\varphi_0 \approx 106^\circ$.

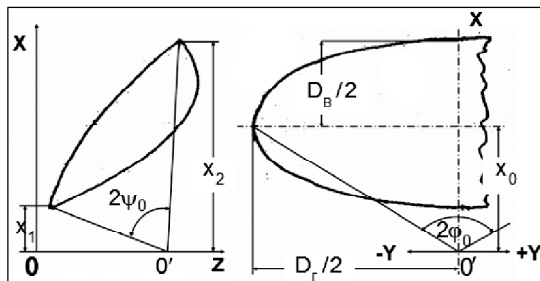


Рис. 3.76

Облучатель антенны выполненный по схеме РРИЭ (см. раздел 1.5.2), имеет практически одинаковую ширину главного лепестка на обеих поляризациях, но по плоскостям он отличается в $\sim 1,4$ раза, что примерно соответствует различию по плоскостям углов облучения данного зеркала.

Коэффициент усиления ($\sim 42,6$ дБ на частоте 11,2 ГГц) почти не зависит от поляризации, а КИП в полосе рабочего диапазона ($10,7 \div 11,7$ ГГц) колеблется в пределах $0,62 \div 68$.

ДН антенны АНЭ, практически одинаковые на обеих поляризациях, значительно отличается (вследствие различия размера апертуры) по плоскостям, как по ширине главного лепестка, так и по уровню бокового излучения.

Защитное действие антенны с экраном, установленным снизу (на рис. 3.75 и 3.76 он не показан), в секторе углов $180^\circ \pm 60^\circ$ больше 27 дБ, что позволяет отнести АНЭ к антеннам с повышенной помехозащищенностью.

АНЭ позволяет, при равной (с осесимметричной антенной) площади раскрыва (и коэффициенте усиления), уменьшить уровень бокового излучения в горизонтальной плоскости или увеличить площадь раскрыва (и коэффициент усиления) без уменьшения ширины главного лепестка в вертикальной плоскости. Оба эти фактора являются весьма важными для антенн РРЛ.

Антенна неосесимметричная с полукруглым раскрывом (АНП), рис. 3.77, как и АНЭ позволяет получить ДН, почти одинаковые по поляризациям, но несколько отличающиеся по плоскостям ДН (и по ширине главного лепестка, и по уровню бокового излучения). Но, АНП, в отличие от АНЭ, значительно проще в изготовлении, так как представляет собой половину осесимметричного параболоида.

Зеркалом антенны может служить половинка уже изготавливаемого параболического зеркала осесимметричной антенны, которое конструктивно состоит из двух частей. Это является важным конструктивным и технологическим преимуществом АНП по сравнению с другими АВО.

Защитный экран (на рис. 3.77 дана фотография антенны без экрана), который очень легко и удобно присоединяется к нижней части зеркала, может быть выполнен (в развертке) в виде кругового сегмента или тупоугольного треугольника с прямолинейными (но лучше «вогнутыми») сторонами. Круговой сегмент и тупоугольный треугольник с «вогнутыми», сторонами обеспечивают общее «размазывание» дифракционных лепестков (без их фокусировки под определенными углами) по более низкому уровню с максимальным его подавлением в области заднего излучения.



Рис. 3.77

Облучатель может быть выполнен в виде РРИэр, РРИпр (предпочтительнее с двускатным срезом) или РРИ какой-либо другой модификации (см. разделы 1.4 — 1.6).

В данной антенне может быть использован облучатель даже и в виде симметричного (конического или пирамидального) РРИ, РРИПОКС или РРИ с двускатным срезом. Но в этом случае (при очень высокой помехозащищенности в горизонтальной плоскости) эффективность антенны будет несколько ниже.

Электрические параметры антенны с полукруглым раскрывом по своим преимуществам аналогичны параметрам АВО с эллиптическим раскрывом и во многом определяются параметрами выбранного облучателя.

3.5.5. Выбор оптимальной формы раскрыва

При разработке и оптимизации зеркальных антенн в большинстве случаев первичной (исходной) является схема антенны, а вторичной (искомой) ДН облучателя, которую синтезируют (или подбирают) исходя из схемы и геоме-

трических размеров антенны. Это объясняется тем, что большинство существующих антенн имеет круглый раскрыв и является осесимметричными. Осесимметричными, как правило, являются и используемые в них первичные излучатели, и облучающие системы. Поэтому подбор оптимальных облучателей для таких антенн особых трудностей не вызывает.

Однако даже среди существующих зеркальных антенн все чаще встречаются неосесимметричные антенны, включая АВО, а для таких антенн подобрать облучатель с оптимальной ДН значительно сложнее.

В то же время, с широким развитием ЭВМ и внедрением в производство новых технологий, проектирование и производство антенн с произвольной формой раскрыва и неосесимметричных облучателей для них значительно упростилось. Это дает возможность изменить подход к разработке неосесимметричных антенн, т. е. либо принять за основу ДН облучателя, считая искомой форму раскрыва антенны, либо подобрать наиболее оптимальный вариант облучателя, изменяя и первое, и второе.

Предлагаемый подход к разработке антенн дает следующие возможности:

- Позволяет определить (при заданной ДН облучателя) оптимальную форму раскрыва и основные геометрические размеры антенны.
- Помогает наметить дальнейшие пути оптимизации ДН облучателя, если полученные результаты не отвечают каким-либо специфическим требованиям, предъявляемым к антенне.
- Выявить (путем анализа контурной карты) наиболее помехоопасные направления и принять меры, улучшающие помехозащищенность антенны именно в этих направлениях.

Последнее наиболее просто достигается увеличением в помехоопасных направлениях размера апертуры (это приводит к уменьшению уровня облучения кромки), а также установкой дополнительных экранов. Поэтому для этой цели желательно строить контурные карты не только в пределах главного, но и в секторе первых боковых лепестков пространственной ДН облучателя.

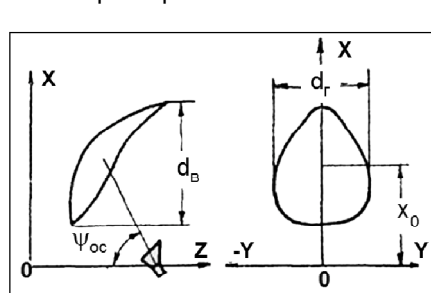


Рис. 3.78

Ниже даны примеры реализации предлагаемого подхода [41] применительно к АВО, для которых разработка облучателя с ДН, близкой к оптимальной (при заданной форме раскрыва), весьма затруднительна.

На рис. 3.78 показано обозначение основных геометрических размеров АВО с произвольной формой раскрыва:

ψ_{oc} — угол наклона оси волноводного выхода облучателя относительно фокальной оси исходного парабооида;

d_b и d_r — размер раскрыва антенны в продольной (вертикальной) и поперечной (горизонтальной) плоскости, соответственно;

x_0 — смещение центра раскрыва антенны в продольной плоскости относительно фокальной оси.

Основой для определения оптимальной формы раскрыва и геометрических размеров антенн служит пространственная ДН облучателя в пределах главного лепестка.

Эта ДН может быть получена как расчетным, так и экспериментальным путем, в частности, путем ее измерения в нескольких плоскостях, проходящих

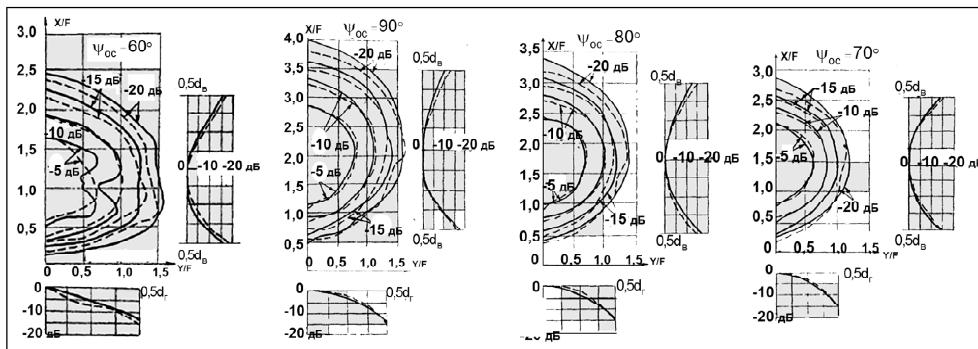


Рис. 3.79

Рис. 3.80

Рис. 3.81

Рис. 3.82

через ось волноводного выхода облучателя под разными углами, а также на разных расстояниях от фазового центра рупора, соответствующим разным точкам предполагаемого контура кромок зеркала, облучаемого тем или иным уровнем.

В качестве исходных были выбраны ДН двух облучателей: осесимметричного РРИ с осесимметричной в пределах главного лепестка ДН (см. раздел 1.4.1) и РРИПОКС с односкатным срезом раскрыва (см. раздел 1.6.2), имеющего в продольной плоскости асимметричную ДН. Результаты расчета, полученные для РРИ и РРИПОКС, показаны соответственно на рис. 3.79 и рис. 3.80 — 3.82.

Слева сверху на каждом из этих рисунков приведены контурные линии распределения амплитуды поля по уровню -5, -10, -15, -20 дБ, а внизу и справа — ожидаемое распределение амплитуды поля соответственно в поперечной и продольной плоскости раскрыва для случая, когда размер раскрыва ограничен контуром -15 дБ (для продольной поляризации — сплошная линия, для поперечной — штриховая). Контурные линии были получены путем машинной обработки экспериментальных пространственных ДН облучателей.

При использовании РРИ получить симметричное распределение в продольной плоскости и круглую форму раскрыва не удалось. Наибольшее приближение к симметричному распределению в продольной плоскости (см. рис. 3.79, справа) соответствует облучению кромки зеркала уровнем -15 дБ, но оптимальная форма раскрыва, определяемая контуром -15 дБ от круглой весьма отличается (не является она круглой и для контура -10 дБ). Антенна при этом имеет следующие размеры: $\psi_{ос} = 60^\circ$, $x_0 \approx 1,25F$, $d_B \approx 1,9F$, $d_r \approx 2,5F$.

При использовании РРИПОКС почти круглая форма раскрыва и осесимметричное распределение получаются для контура -15 дБ (см. рис. 3.82), а антенна имеет следующие размеры: $\psi_{ос} = 70^\circ$, $x_0 \approx 1,4F$, $d_B \approx 2,2F$, $d_r \approx 2,1F$.

При вертикальном выходе облучателя ($\psi_{ос} = 90^\circ$) в продольной плоскости наблюдается некоторое нарушение симметрии распределения амплитуды и отклонение раскрыва от круглой формы (см. рис. 3.80). В этом случае (при $F = 0,575$ м) зеркало антенны для контура -15 дБ имеет следующие размеры: $x_0 \approx 2,1 F \approx 1,2$ м, $d_r \approx 2,6 F \approx 1,5$ м, $d_B \approx 2,8 F \approx 1,6$ м.

Полученные размеры весьма близки к размерам зеркала АНК-1,5, для которой данный облучатель был разработан (см. раздел 3.6.3), но не равны им. Большее приближение раскрыва к круглой форме ($d_r \approx 1,46$ мм, $d_B \approx 1,53$ мм) получается при $F = 0,546$ м, но симметричного распределения в продольной плоскости раскрыва все равно не получается. Все перечисленные «нестыковки

ки» свидетельствует о том, что зеркало антенны АНК-1,5, которая была разработана раньше, чем возникла данная методика, при использовании его с этим облучателем (оптимизированным для диапазона 8 ГГц) все же не совсем оптимально.

По результатам анализа пространственной ДН облучателя и с учетом специфических требований, предъявляемых к антенне, включая высокую эффективность при хорошей помехозащищенности в горизонтальной плоскости и наличие вертикального выхода облучателя, был разработан и исследован действующий макет неосесимметричной антенны — АН-1,5, имеющий равную с АНК-1,5 площадь раскрыва ($1,7 \text{ м}^2$) и примерно равный 1,5 м размер раскрыва в поперечной плоскости. При этом в АН-1,5 были дополнительно внесены и некоторые конструктивные изменения, упрощающие (по сравнению с АНК-1,5) технологию ее изготовления.

Основные геометрические размеры АН-1,5 с вертикальным выходом и ее общий вид показаны на рис. 3.83, слева, а АНК-1,5 — справа.

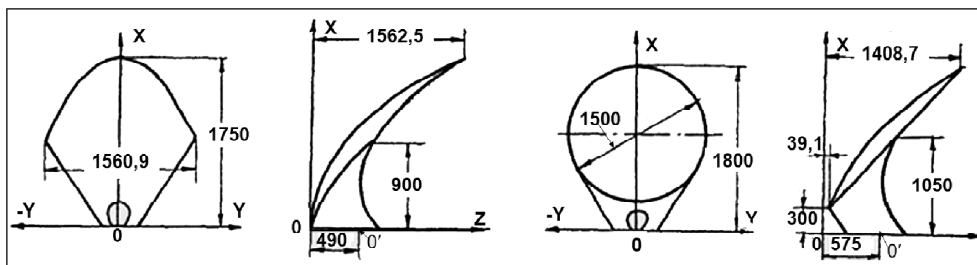


Рис. 3.83

Зеркало АН представляет собой вырезку из параболоида вращения половиной эллиптического цилиндра с размером полуосей 1,75 и 0,91 м. Кроме того, в нижней половине оно дополнительно усечено с боков двумя плоскостями, параллельными фокальной оси, которые образуют боковые защитные экраны с криволинейной кромкой. Эта антенна по сравнению с АНК-1,5 более проста конструктивно.

Основание антенны представляет собой решетчатую раму подковообразной формы, «прозрачную» для осадков. Низ зеркала АН-1,5, хотя и является, в отличие от АНК-1,5, частью параболоида, но фактически служит экраном.

Коэффициент усиления АН-1,5 в диапазоне 7,9÷8,4 ГГц колеблется в пределах 40,0...40,5 дБ, а КИП не ниже 0,65 (0,65...0,7), что характерно для антенн с высокой эффективностью.

При расчете КИП в поверхность раскрыва АН-1,5 включена нижняя часть параболического зеркала, хотя она фактически является только экраном и не участвует в формировании главного лепестка. Если учитывать только действующую площадь раскрыва АН-1,5, то ее КИП будет еще выше.

ДН АН-1,5 в поперечной (горизонтальной) плоскости при поперечной (сплошная линия) и продольной (пунктир) поляризации показаны на рис. 3.84.

Уровень первых боковых лепестков АН-1,5 ниже -25 дБ. Уровень ее ближнего и дальнего бокового излучения много ниже универсальной ДН (3.15), кривая 1, причем не только с ограничением уровнем на 10 дБ ниже изотропного, как это дано в (3.15), но и без ограничения. Кроме того, уровень апертурных лепестков (в секторе углов примерно до 40°) удовлетворяет и (3.12), самой

жесткой из всех существующих (на сегодня) ДН МСЭ. Эта ДН рекомендована к использованию в поперечной плоскости (примерно до 90°) только для рупорно-параболических антенн и антенн с вынесенным облучателем и только со слабым облучением края

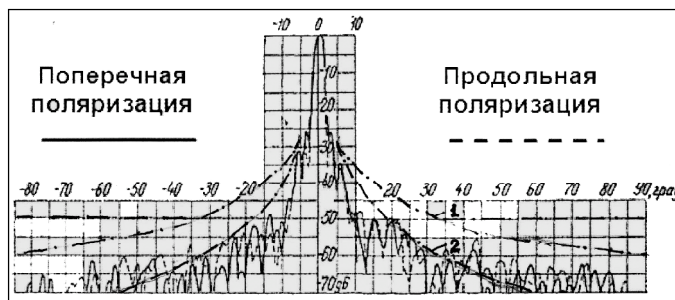


Рис. 3.84

рефлектора, т. е. для антенн с низкой эффективностью. Для антенн с более высоким уровнем облучения края зеркала (для антенн с высокой эффективностью) допускаются превышения, которые наблюдаются здесь только при углах выше 40° .

Очень низкий уровень апертурных лепестков, а также дальнего и заднего излучения, который в переднем полупространстве примерно на 20...25 дБ, а в заднем — более чем на 30 дБ ниже изотропного (ниже уровня шумов измерительной установки), позволяет, несмотря на высокую эффективность, отнести АН-1,5 к антеннам с очень высокой помехозащищенностью.

Согласование данной антенны с питающим трактом практически полностью определяется согласованием ее облучателя. КСВ в диапазоне $7,9 \div 8,4$ ГГц при поперечной поляризации не превышает 1,04, а при продольной — 1,02.

Новый подход к разработке неосесимметричных зеркальных антенн дает возможность быстро и с минимальными затратами разработать антенну с очень высокими электрическими параметрами, отвечающую также определенным дополнительным требованиям, но при условии, что форма раскрыва антенны может быть произвольной. Этот же подход может быть использован и при разработке неосесимметричных антенн с разным в главных плоскостях размером апертуры. Но в этом случае при расчете оптимальной формы раскрыва в качестве базовой должна быть заложена ДН облучателя с разной в главных плоскостях шириной главного лепестка (см. раздел 1.5).

3.5.6. Влияние осадков

Защита антенны от атмосферных осадков является одной из важнейших проблем при разработке и эксплуатации антенн, так как и сами защитные укрытия, и скапливаемые на них осадки, включая их распределение на поверхности укрытия или защитной крышки, могут значительно ухудшить параметры антенны даже в том случае, если изначально (без укрытия) они были очень высокими.

Необходимость укрытия и герметизации разных антенн различна. Для одних антенн, в частности, для РПА необходимо герметичное укрытие всей антенны, а для других — можно ограничиться всего лишь герметизацией облучателя.

Требования к укрытию зависят и от климатического района, в котором антенна эксплуатируется. Однако эксплуатация РПА без укрытия ее в целом, причем герметичного, исключена в любом климатическом районе земного шара. Необходимо укрытие антенны в целом (негерметичное, если герметизи-

рован облучатель) и для осесимметричных антенн с большой глубиной основного зеркала и/или, имеющих большой защитный экран.

Что касается АВО, рассмотренных в данной работе, то их можно эксплуатировать без укрытия антенны в целом не только в тех климатических районах земного шара, где нет осадков в виде снега, но и там, где такие осадки немногочисленны и/или не слишком обильны. Но для этого необходимо исключить (или значительно уменьшить) вероятность скопления осадков, включая лед и снег, на поверхности крышки, закрывающей раскрыв облучателя, а также на определенных конструктивных элементах антенны.

Чтобы определить размер «бедствия» (степень ухудшения электрических параметров) были проведены исследования влияния на ДН, КУ и КСВ АВО, выполненных по предложенным выше схемам, при наличии на крышке облучателя льда и снега разной толщины.

Осадки наносились на крышку и удерживались на ней искусственно. Испытания проводились в диапазоне 12 ГГц, где влияние осадков (по сравнению с другими рабочими диапазонами, для которых разрабатывались антенны) наиболее сильное.

Влияние осадков на ДН показано на рис. 3.85, где приведены огибающие максимумов боковых лепестков в горизонтальной (поперечной) плоскости при работе АВО (без экрана) на горизонтальной (слева) и вертикальной (справа) поляризации, соответственно.

Измерения проводились при наличии на крышке облучателя сухого снега толщиной 60 мм (кривые 1 — пунктир) и сухого льда толщиной 2...3 мм (кривые 2 — штрихпунктир). Кроме того, для определения возможности работы антенны в экстремально неблагоприятных погодных условиях исследовалось влияние насыщенного водой снега толщиной 60 мм (кривые 3 — точки). Для сравнения там же показаны огибающие максимумов бокового излучения при отсутствии на облучателе каких-либо осадков (кривые 4 — сплошная линия).

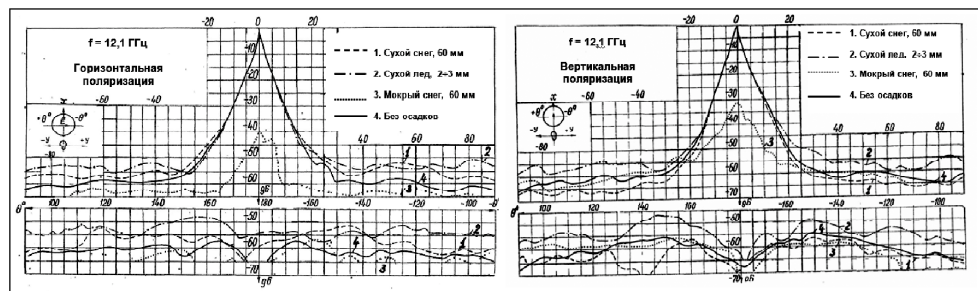


Рис. 3.85

Влияние осадков на КУ

Вид осадков	Толщина слоя, мм	Потери КУ, дБ
Лед	2...3	1,0
Сухой снег	30...40	1,0
Сухой снег	60	2,5
Снег с водой	30...40	15,0
Снег с водой	60	30,0

Анализ показывает, что при наличии на крышке облучателя сухого льда и сухого снега разной толщины потери усиления (до 2,5 дБ) наблюдались только

при толщине снега ~ 60 мм. При этом уровень бокового и заднего излучения антенны в горизонтальной плоскости повышается на 5÷10 дБ. Снег, насыщенный водой, при толщине 30 мм увеличивает потери до 15 дБ, а при 60 мм потери достигают 30 дБ.

Однако талый снег ни на одной из крышек облучателя, описанных выше АВО, удержаться не может, но он может удерживаться на крышках облучателей каких-либо других антенн, например, верхней части укрытия облучателя АДЭ.

Влияние осадков на согласование АВО (в диапазоне 9,6÷12,2 ГГц), рис. 3.86, на разных частотах различно и сильно зависит от вида и толщины осадков, рис. 3.86.

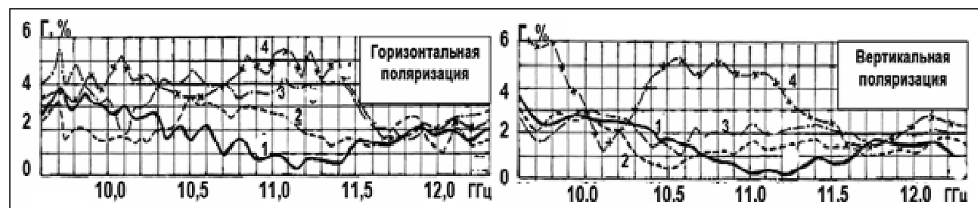


Рис. 3.86

Наличие сухого снега толщиной до 60 мм и льда толщиной до 2÷3 мм (благодаря наклонному положению крышки облучателя) почти не оказывает влияния на согласование антенны с питающим трактом, см. рис. 3.86. В этом случае коэффициент отражения при горизонтальной, и при вертикальной поляризации в диапазоне 10,7÷11,7 ГГц не превышает 2,5% (кривые 1). Рыхлый и влажный снег толщиной 60 мм изменяет коэффициент отражения на 1÷2% (кривые 2), а плотный влажный снег уже при толщине 30 мм, изменяет коэффициент отражения на 2÷3% (кривые 3).

Наиболее сильное влияние оказывают куски тающего льда неравномерной толщины (6÷10 мм) и произвольной формы (кривые 4). В этом случае коэффициент отражения на отдельных частотах достигает 5÷6%. Следовательно, необходимо обеспечить такой наклон крышки облучателя, при котором тающий снег и лед на ней удержаться не смогут.

Вероятность скопления осадков на крышке облучателя определялась в районе средней полосы (Подмосковье) в течение двух сезонов, отличающихся очень резкими перепадами температуры и обилием снегопадов и гололеда.

Для испытаний был выбран облучатель на 2 ГГц, имеющий самый большой размер крышки, так как на крышках облучателей меньшего размера, соответствующих другим диапазонам, вероятность скопления осадков значительно меньше. Крышка облучателя, изготовленная из пенопласта, была упрочнена сверху стеклотканью, как это имело место в серийных АВО. Поэтому ее поверхность была слегка шероховатой, что увеличивало вероятность скопления на ней твердых осадков. Угол наклона крышки относительно горизонта (~40°) соответствовал наименьшим углам наклона крышки облучателей АВО, рассмотренных в данной главе.

Исследования показали, что в течение 9% (33 дня) годового периода на крышке удерживался слой инея или льда толщиной 1÷2 мм, в течение 1,3% времени (5 дней) — слой сухого снега толщиной до 10 мм, и лишь в 0,6% (2 дня) годового периода толщина сухого снега составляла 60 мм. Во всех слу-

чаях осадки по поверхности крышки были распределены равномерно. Тающий снег и лед на такой крышке не удерживались вообще.

Таким образом, АВО с облучателем, крышка которого наклонена относительно горизонтали на угол порядка 40° (и более), в средних климатических зонах страны можно эксплуатировать без укрытия антенны в целом. При таком исполнении значительное уменьшение усиления антенны (до 2,5 дБ) и увеличение уровня бокового излучения (на $5 \div 10$ дБ) наблюдается лишь в очень малом проценте времени (0,6% годового периода).

При использовании в АВО облучателей типа РРИПОКС с односкатной или двускатной крышкой и РРИ с двускатной крышкой необходимый наклон крышки обеспечивается автоматически.

3.6. АВО для РРЛ

3.6.1. Требования, предъявляемые к антеннам РРЛ

На РРЛ, для которых выделены определенные полосы частот в диапазоне от 0,3 до 30 ГГц (и выше) используются самые разные типы антенн. Конкретный выбор антенны РРЛ во многом определяется не только электрическими параметрами и стоимостью, но и массой, и ветровой площадью, и выходом облучателя, так как в большинстве случаев они устанавливаются на высоких мачтах, где последние три параметра могут играть немаловажную роль.

Основными электрическими параметрами антенн РРЛ являются:

- Коэффициент усиления (КУ).
- Ширина главного лепестка ДН по уровню -3 дБ ($2\theta_{0,5}$).
- Уровень первого бокового лепестка (ПБ).
- Защитное действие, определяемое величиной снижения излучения в заданном секторе углов заднего полупространства (обычно: $180^\circ \pm 40 \dots 45^\circ$).
- Коэффициент стоячей волны — КСВ (или коэффициент отражения — $\Gamma, \%$) определяемый требованиями, предъявляемыми к аппаратуре (КСВ реальных антенн РРЛ колеблется в пределах $1,04 \div 1,2$).
- Кросс-поляризационная развязка, определяемая, как правило, максимально допустимым уровнем поля кросс-поляризации в пределах определенного сектора углов вблизи направления главного излучения.

Этот сектор для антенн РРЛ ограничивают, обычно, по азимуту контуром главного лепестка на основной поляризации по уровню -1 дБ. Вводят определенные ограничения и по углу места, которые для АВО выполняются автоматически, потому что в угломестной (продольной) плоскости поле кросс-поляризации этих антенн теоретически равно нулю, а практически — минимально по сравнению со всеми другими плоскостями и любыми осесимметричными антеннами. Следует отметить, что требования по кроссполяризации не являются общими, а выдвигаются, как правило, только в тех случаях, когда предусматривается одновременная работа антенны на обеих поляризациях.

В зависимости от совокупности основных электрических параметров антенны РРЛ подразделяются [43] на стандартные, высококачественные и сверхвысококачественные. Существуют также антенны, улучшенные по одному из основных параметров, например, по помехозащищенности, эффективности, согласованию и др.

Выбор «качества» антенны для конкретной линии зависит от многих факторов, включая параметры аппаратуры, емкость линии, протяженность пролета,

помеховую ситуацию (насыщенность данного района системами связи, работающими на тех же частотах).

В связи с быстрым развитием сети радиорелейных и спутниковых систем требования к помехозащищенности антенн РРЛ постоянно повышаются, причем не только к защитному действию антенны (уровню заднего излучения в определенном секторе углов), но и к уровню бокового, определяющего электромагнитную совместимость антенны с другими антенными устройствами. С увеличением числа каналов растут требования и к согласованию антенн с питающим трактом.

Международные рекомендации по ДН антенн РРЛ приведены в разделе 3.1 данной главы.

Ниже рассмотрены антенны для РРЛ, выполненные по схеме АВО, которые были внедрены в серийное производство.

3.6.2. АНК-1,1 для диапазонов 4, 6, 8, 11 и 12 ГГц

Антенна неосесимметричная с круглым раскрывом диаметром 1,1 м (АНК-1,1) [29], [38] имеет четыре варианта исполнения: АНК-1,1/4, АНК-1,1/6; АНК-1,1/8, АНК-1,1/11, предназначенных для работы в диапазоне 4, 6, 8 и 11 ГГц, соответственно, которые в основном различаются конструкцией и/или размером облучателя.

Каждое из исполнений антенны способно, без замены и перестройки облучателя работать не только в оптимизированном диапазоне частот (ОДЧ), но и в расширенном диапазоне частот (РДЧ), включающем и более высокие, и более низкие частоты. Со стороны высоких частот возможности антенны ограничены минимально допустимой эффективностью, а со стороны низких минимально допустимым согласованием с питающим трактом, которое ухудшается при приближении частоты к критической частоте питающего волновода.

Конструкция антенны включает в себя следующие основные узлы, рис. 3.87, слева: зеркало — 1, облучатель — 2, основной экран — 3.

Кроме того, в комплект антенны (при необходимости) могут входить: подставка — 4, дополнительный зубчатый экран (см. рис. 3.87, в центре), волноводный изгиб и чехол.

Зеркало антенны имеет следующие основные размеры: $D = 2R = 1,1$ м, $F = 0,5$ м, $x_1 = 0,1$ м; $x_2 = 1,2$ м.

Облучатель в антеннах АНК-1,1/6; АНК-1,1/8, АНК-1,1/11 выполнен в виде РРИПОКС (см. раздел 1.6.2) с односкатным срезом раскрыва (см. рис. 3.87, слева и в центре), а облучатель АНК-1,1/4 представляет собой РРИ с двускатным срезом раскрыва [31] (см. рис. 3.87, справа).

Волноводный выход облучателей всех исполнений антенны направлен под углом 22° относительно вертикали. Поэтому при использовании в качестве фидерной линии кабеля или гибкого волновода селектор присоединяется к облучателю непосредственно, а при наличии жесткого вертикального волноводного тракта предусматривается использование

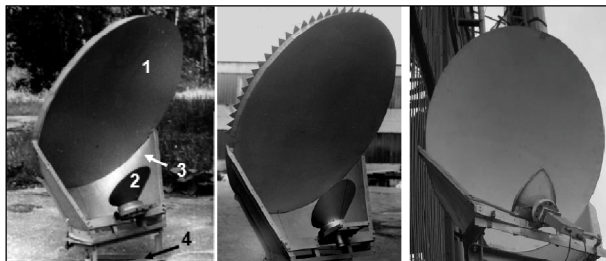


Рис. 3.87

специально разработанного волноводного изгиба, который почти не оказывает влияния на параметры антенны.

Крышки, герметизирующие раскрыв облучателей, выполнены из радиопрозрачного материала с очень малым коэффициентом отражения. Кроме того, конструкция облучателей такова, что отраженное от крышек облучателей поле, способное все же попасть в волновод, расфазировано.

Геометрические размеры рупоров для всех исполнений антенны выбраны таким образом (см. разделы 1.4 и 1.6), чтобы их ДН в соответствующем ОДЧ были близки к оптимальным.

Экраны (основной — конический и дополнительный — зубчатый), предназначены для улучшения помехозащищенности антенны.

Основной экран присоединяется к нижней части зеркала и укреплен на кронштейне (кронштейн является несущей конструкцией и дает возможность установить антенну непосредственно или вместе с подставкой на горизонтальную консоль). Дополнительный (зубчатый) экран устанавливается по кромке верхней части зеркала и дополнительно улучшает помехозащищенность антенны, в основном в вертикальной плоскости и в заднем направлении горизонтальной плоскости при вертикальной поляризации.

Внимание! Необходимо обеспечить очень плотное прилегание экрана к зеркалу.

Подставка с юстировочным устройством, позволяет плавно поворачивать и жестко фиксировать антенну в пределах $\pm 3^\circ$ — по углу места и $\pm 5^\circ$ — по азимуту.

Защита антенны от атмосферных осадков осуществляется за счет конструкции самой антенны и ее элементов.

Рабочая поверхность зеркала защищена от осадков благодаря «отрицательному» наклону самого зеркала. Крышки облучателей и стенки экрана составляют с вертикалью сравнительно малый угол, что не способствует скоплению на них осадков не только в виде дождя, но и снега. «Прозрачной» для осадков сделано и основание кронштейна, и основание юстировочного устройства. Благодаря этим мерам антенна, как показали проведенные испытания, в большинстве климатических районов страны может эксплуатироваться без укрытия ее в целом. Однако, при необходимости, предусматривается возможность укрытия антенны чехлом, изготовленным из гибкой тонкой радиопрозрачной пленки, которая практически не влияет на электрические параметры антенны.

Масса АНК-1,1 без подставки (при изготовлении антенны из алюминиевых сплавов) составляет ~ 20 кг, а с подставкой — ~ 30 кг.

Электрические параметры макета антенны [29] для двух поляризаций (Г и В) в поперечной плоскости на средней частоте (ПБ, ЗД и КСВ — в пределах всей полосы) оптимизированного диапазона частот (ОДЧ) даны в таблице.

Кроме того, в таблице приведен расширенный диапазон частот (РДЧ), в пределах которого антенна (без замены и перестройки облучателя) сохраняет работоспособность и хорошие электрические параметры, и диаметр волноводного выхода облучателя.

Исполнение антенны	ОДЧ, ГГц	D/λ _{ср}	KY, дБ (f _{ср})	KIP (f _{ср})	2θ _{0,5} (f _{ср})	ПБ дБ	ЗД дБ	KCB	РДЧ**, ГГц	2r мм
АНК-1,1/4 Г	3,4÷4,2	13,9	31,0	0,65	5,3	-22	27	<1,07	3,4÷7,0	70
В			31,0	0,65	5,3	-23	25	<1,06		
АНК-1,1/6 Г	5,67÷6,17	21,7	35,0	0,67	3,26	-25	28	<1,06	4,8÷8,4	43
В			35,0	0,67	3,23	-25	26	<1,04		
АНК-1,1/8 Г	7,9÷8,4	29,9	37,9	0,70	2,67	-24	32	<1,05	10,0÷11,7	32
В			37,9	0,70	2,5	-25	28	<1,05		
АНК-1,1/11* Г	10,7÷11,7	41,1	41,0	0,75	1,63	-25	35	<1,05	9,4÷13,25	24
В			41,0	0,75	1,67	-23	35	<1,02		
Г	11,7÷12,5	44,3	41,5	0,73	1,56	-27	37	<1,03		
В			41,5	0,73	1,47	-27	37	<1,02		

*АНК-1,1/11 разработана с учетом оптимизации ее параметров не только в диапазоне 10,7÷11,7 ГГц, но и в диапазоне 11,7÷12,5 ГГц, причем без замены и перестройки облучателя, поэтому она имеет два оптимизированных диапазона частот.

** РДЧ, фактически, значительно шире указанного в таблице, так как со стороны длинных волн он ограничивается не направленными свойствами антенны, а максимально допустимым значением КСВ, который с уменьшением размера сечения волновода в длинах волн постепенно увеличивается, а при приближении к критической частоте возрастает очень резко.

Уровень первого бокового (ПБ) лепестка, защитное действие (ЗД) антенны в секторе углов 180°±40° и коэффициент стоячей волны (КСВ) даны для всей полосы ОДЧ.

Параметры макета антенны, не вошедшие в таблицу: коэффициент использования поверхности (КИП), соответствующий значениям КУ, приведенным в таблице, равен 0,67÷0,75; уровень максимумов кроссполяризации КР_{max} = -(16÷19) дБ и уровень кроссполяризации в направлении главного излучения КР₀ < -40 — для всех исполнений антенны. При таком уровне максимумов кроссполяризации уровень поля в пределах заданного для антенн РРЛ сектора углов не превышает -25 дБ.

Следует отметить, что облучатель макета для диапазонов 6, 8 и 11 — 12 ГГц состоял из одного и того же рупора, заканчивающегося диаметром 110 мм, к которому были приданы три сменных рупорно-волноводных перехода, обеспечивающие для каждого диапазона переход к оптимальному сечению излома и типовому сечению волновода. В результате в каждом из этих диапазонов облучатель работал в оптимальном режиме.

Электрические параметры серийной антенны [38] несколько отличаются от параметров макета, так как они соответствуют значениям, приведенным в ТУ, где по требованию завода-изготовителя были даны гарантированные параметры, т. е. с весьма большим запасом.

Кроме того, в опытных образцах и серийных антеннах облучатели всех исполнений закрыты герметичной крышкой, изготовленной из пенопласта и упрочненной сверху слоем стеклоткани. Такая крышка, в отличие от пленочной, используемой в первоначальном действующем макете, КУ и КСВ, хотя и незначительно, но ухудшает. К тому же, облучатели серийных антенн для каждого диапазона изготавливались индивидуально и отличались от макетов геометрическими размерами. Кроме того, облучатели АНК-1,1/6 и

АНК-1,1/11 в полосе ОДЧ были дополнительно оптимизированы по согласованию (см. раздел 1.7).

Диаграммы направленности АНК1,1/11 (экспериментальные — ЭДН, гарантированные — ГДН и ДН МСЭ) показаны на рис. 3.88 и рис. 3.89.

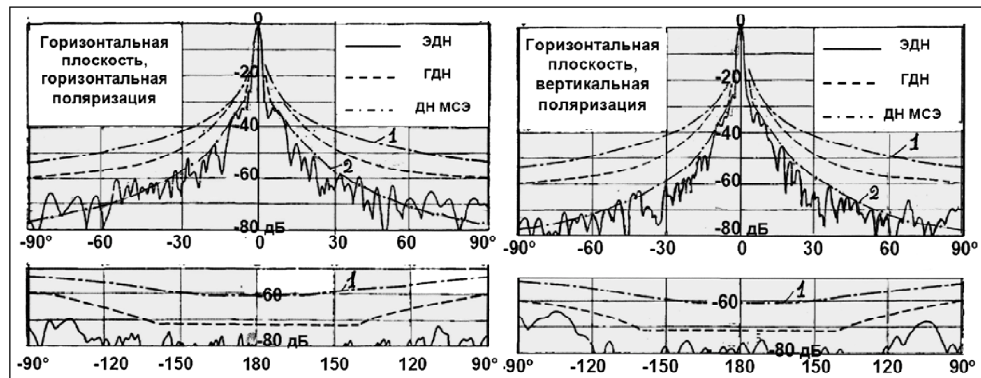


Рис. 3.88

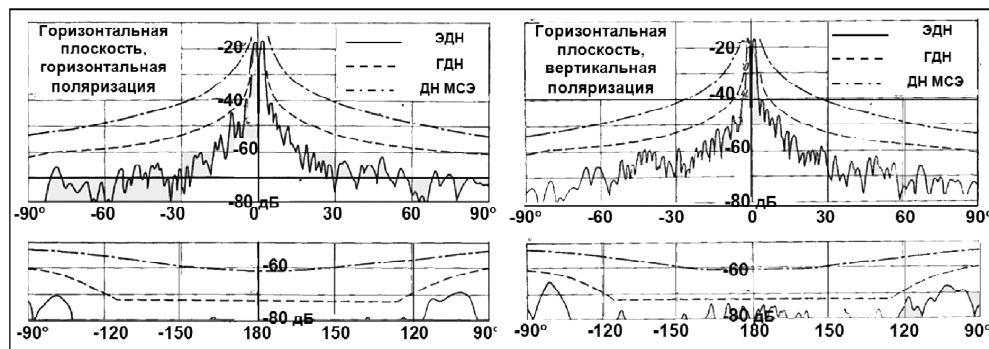


Рис. 3.89

ЭДН — основные (см. рис. 3.88) и кросс-поляризационные (см. рис. 3.89) в горизонтальной (основной для РРЛ) плоскости приведены для нижней (10,7 ГГц) частоте рабочего диапазона 10,7 — 11,7 ГГц, где уровень бокового излучения наиболее высок.

ГДН [38], справедливые в пределах всего ОДЧ, гарантируют, что в 99% кругового сектора углов уровень реального бокового излучения не будет превышать гарантированного ни на одной из частот ОДЧ. Поэтому они рассчитаны на худший случай, соответствующий, как правило, горизонтальной поляризации и самой низкой частоте каждого ОДЧ. Для АНК-1,1/11 гарантированный запас по сравнению с реальной ДН даже на самой низкой частоте ОДЧ (см. рис. 3.89 и рис. 3.90) составляет в основном больше 6 — 10 дБ, а на других, более высоких, частотах он еще больше.

ДН МСЭ, действующая на момент разработки этой антенны:

$G(\varphi) = 52 - 10\log(D/\lambda) - 25\log\varphi$ и пересчитанная по (3.14) относительно коэффициента усиления антенны (кривая 1), дана здесь без ограничения каким-либо фиксированным уровнем (она приведена штрихпунктирной линией, а на рис. 3.88 обозначена цифрой 1). По сравнению с ней реальный уровень боко-

вого излучения данной антенны ниже на 15 — 20 дБ, а гарантированный — более чем на 10 дБ. Реальный уровень бокового излучения АНК-1.1/11 практически удовлетворяет и более строгим, универсальным, ДН для основной (3.15) и перекрестной (3.16) поляризации, причем под дальними углами с очень большим запасом. В заднем полупространстве этот запас составляет 25 дБ, так как защитное действие АНК-1.1/11 относительно изотропного уровня не менее 35 дБ. Кроме того, реальная ДН АНК-1.1/11 в секторе апертурных лепестков удовлетворяют и самой жесткой (на сегодня) ДН МСЭ (3.12), рекомендованной для РПА и АВО с низким уровнем облучения края зеркала, т. е. с малой эффективностью (см. рис. 3.88, кривая 2), несмотря на то, что эта антенна имеет очень высокую эффективность (КИП больше 0,7).

Справочные диаграммы направленности (СДН) всех исполнений антенны [38], рис. 3.90, построенные на базе ГДН, ниже их примерно на 3 дБ, а поэтому более близки к реальным. Они предусматривают, что реальный уровень бокового излучения примерно в 90% кругового сектора углов не превышает их уровня, хотя фактические гарантии значительно больше.

Внимание! СДН даны с использованием переменного масштаба.

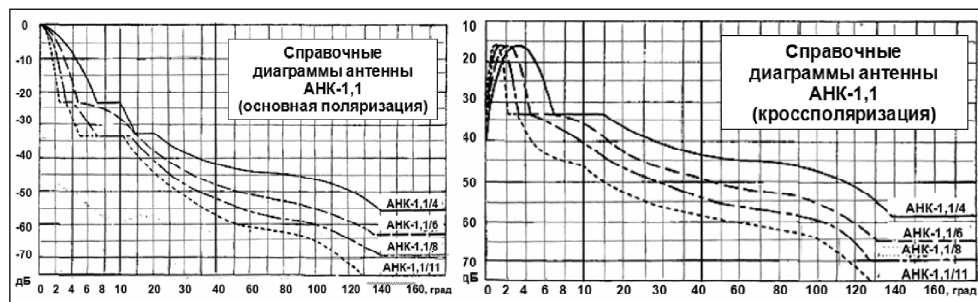


Рис. 3.90

СДН (и ГДН) АНК-1.1 всех исполнений даны в [38] не только в виде графиков, но и (для удобства машинной обработки) в виде эмпирических формул, справедливых в полосе ОДЧ. Вне ОДЧ уровень бокового излучения в низкочастотной части может быть несколько выше, чем в ОДЧ, а в высокочастотной — ниже.

Наличие в ГДН (и СДН) большого гарантированного запаса объясняется требованием завода-изготовителя, в соответствие с которым в основе ГДН (и построенных на их базе СДН) для ОДЧ АНК-1.1 всех исполнений лежат огибающие максимумов боковых лепестков очень большого числа экспериментальных ДН (двух опытных образцов и трех действующих макетов), измеренные на трех частотах ОДЧ (двух крайних и средней). Они, фактически, учитывают уровень самого высокого бокового лепестка, включая любой случайный выброс, вызванный плохим качеством изготовления конкретной антенны и/или неточностью измерений, который встретился хотя бы на одной из 30-ти ДН, принадлежащих 5-ти разным антеннам, включающим для каждой из них две поляризации и три частоты (две крайние и среднюю).

Коэффициент усиления (КУ) и использования поверхности (КИП) в зависимости от частоты в пределах РДЧ показан на рис. 3.91.

Реальные значения КУ выше приведенных, так как запас по КУ составляет $\sim(0,2 \div 0,3)$ дБ. Наивысшие значения КИП наблюдаются в полосе ОДЧ. В сторо-

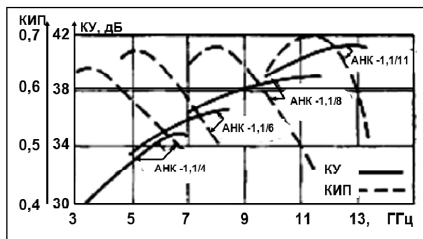


Рис. 3.91

ну высоких частот КИП плавно уменьшается. Примерно такая же тенденция наблюдается и в сторону низких частот. Но работоспособность антенны со стороны низких частот ограничивается не эффективностью, падающей весьма медленно, а максимально допустимым значением КСВ, который (с уменьшением относительного размера волновода) растет гораздо быстрее, чем падает эффективность, о чем уже было сказано.

Согласование антенны с питающим трактом показано на рис. 3.92 для всех четырех исполнений антенны в виде зависимости КСВ от частоты при горизонтальной (Г) и вертикальной (В) поляризации.

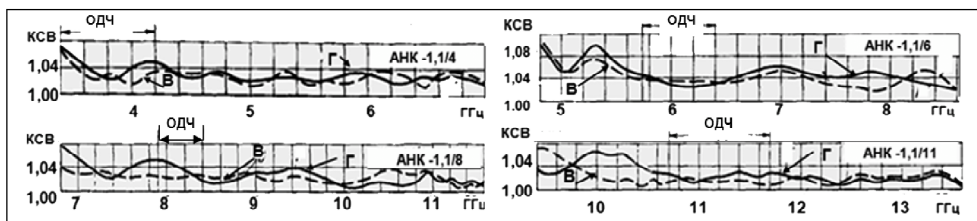


Рис. 3.92

Следует отметить, что облучатели серийных исполнений антенн, кроме АНК-1,1/8, в полосе ОДЧ были оптимизированы и по направленным свойствам, и по согласованию (см. раздел 1.7).

Благодаря оптимизации (см. рис. 3.92) КСВ АНК-1,1/4, АНК-1,1/6 и АНК-1,1/11 в большей части полосы ОДЧ значительно ниже, чем на прилегающих к ней частотах, особенно нижних, где наблюдается значительное увеличение КСВ. Это увеличение вызвано, в основном, относительным уменьшением (в длинах волн) размера волноводного выхода облучателя и самого рупора.

Полоса РДЧ со стороны нижних частот в данном случае была ограничена условно значением КСВ порядка $1,07 \div 1,08$. Если же допустить большее значение КСВ, то ширина РДЧ в сторону нижних частот может быть увеличена. С увеличением частоты наблюдается общая тенденция к уменьшению КСВ, что объясняется увеличением размеров облучателя в длинах волн и более низким уровнем облучением кромки основного рупора.

Ширина главного лепестка по уровню половинной мощности, $(2\theta_{0,5})$ в пределах всего РДЧ практически одинакова на обеих поляризациях (Е и Н), рис. 3.93.

Основные достоинства и недостатки:

Основными достоинствами всех исполнений АНК-1,1 являются очень высокие электрические параметры, реализуемые при малых $D/\lambda_{ср}$, рав-

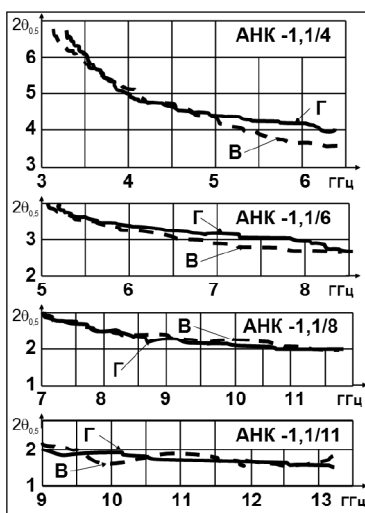


Рис. 3.93

ных примерно 44, 41, 30, 22 и даже 14. Реальные ДН всех исполнений АНК-1,1 удовлетворяют, причем с большим запасом, не только современным ДН МСЭ для антенн РРЛ (3.11) и унифицированной (более жесткой) ДН (3.15), но и требованиям, предъявляемым к антеннам с очень высокой помехозащищенностью, отличаясь при этом высокой эффективностью и, как правило, очень хорошим согласованием с питающим трактом. По совокупности реальных параметров, исключая уровень максимумов кроссполяризации, их можно отнести к классу антенн высокого или сверхвысокого качества.

Основным недостатком АНК-1,1 (единственным в части электрических параметров) является высокий, как и у многих других РПА и АВО, уровень максимумов кросс-поляризации в горизонтальной плоскости ($-17 \div -19$ дБ), однако в направлении главного излучения развязка по поляризациям составляет более 40 дБ.

Как уже было сказано, два максимума кроссполяризации этой антенны лежат в поперечной плоскости, которая для антенн РРЛ является горизонтальной. Требования к кросс-поляризации в этой плоскости значительно меньше, чем в вертикальной. Поэтому при точной юстировке антенны, благодаря низкому уровню кросс-поляризационного излучения вблизи главного направления, высокий уровень максимумов кросс-поляризации не является помехой. Что касается продольной (вертикальной) плоскости, где требования по кросс-поляризации к антеннам РРЛ значительно выше, то АНК, как и все другие антенны этого типа, имеет в этой плоскости минимум кросс-поляризационного излучения, а поэтому способна удовлетворить самым строгим требованиям.

Конструктивными достоинствами АНК1,1 (по сравнению с РПА) являются значительно меньшие, соизмеримые с осесимметричными антеннами, размеры и материалоемкость и, как следствие, меньшая масса и стоимость.

Конструктивным недостатком, причем единственным, является (по сравнению с осесимметричными антеннами) более сложная технология изготовления и как следствие — несколько более высокая стоимость. Но следует отметить, что осесимметричные антенны со столь высокими электрическими параметрами при столь же малых, как АНК 1,1, относительных размерах реализовать вообще невозможно.

3.6.3. АНК-1,5 для диапазонов 2, 4, 6, 8 и 11 ГГц

Антенна неосесимметричная с круглым раскрывом диаметром 1,5 м — АНК-1,5 [40], [42], рис. 3.94, имеет, как и АНК-1,1, несколько исполнений: АНК-1,5/2, АНК-1,5/4-6; АНК-1,5/8 и АНК-1,5/11, предназначенных соответственно для работы в диапазонах 2, 4, 6 — 8 и 11 ГГц. Эти исполнения в основном отличаются размерами облучателя и диаметром его волноводного выхода.

Каждое исполнение АНК-1,5, как и АНК-1,1, способно, без замены и перестройки облучателя работать не только в оптимизированном диапазоне частот (ОДЧ), но и в расширенном диапазоне частот (РДЧ), включающем и более высокие, и более низкие частоты. Но полосы РДЧ более узкие, чем полоса рабочего диапазона широкодиапазонной АНК-1,5 (см. раздел 3.5.3), так как ее облучатели были оптимизированы отдельно для одного (или двух) рабочих диапазонов (т. е. для более узких полос).

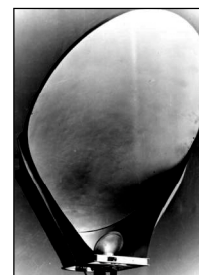


Рис. 3.94

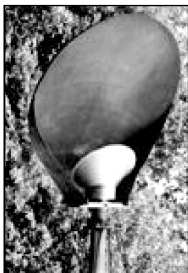


Рис. 3.95

Такая оптимизация позволила увеличить эффективность антенны в пределах каждого ОДЧ и уменьшить продольный размер рупоров за счет увеличения (до максимально допустимой величины) угла раствора малого рупора (см. раздел 1.4.2).

Параметры АНК-1,5/2, приведенные в данной работе, в отличие от других исполнений этой антенны, получены при испытании действующего макета, рис. 3.95, и в полосе РДЧ не исследовалась.

Но по аналогии с другими исполнениями ее рабочий диапазон может быть также расширен (по сравнению с ОДЧ), по крайней мере, в сторону более высоких частот, где возможности всех исполнений антенны ограничены только минимально допустимой эффективностью. В сторону нижних частот расширение диапазона не может быть значительным, так как, чтобы несколько уменьшить абсолютные размеры ее рупора, его относительные размеры (в длинах волн) были минимизированы, поэтому запаса по расфазировке у него почти осталось.

Основным конструктивным достоинством всех исполнений АНК-1,5 является вертикальный выход облучателя, что роднит эту антенну с РПА и позволяет непосредственно, без волноводных изгибов, присоединить облучатель к жесткому вертикальному волноводному тракту.

При обеспечении этого важного конструктивного преимущества реализовать идеально симметричное распределения амплитуды поля в продольной плоскости при круглой форме раскрыва, как показал анализ (см. раздел 3.5.5), не удалось. Это привело к небольшому снижению эффективности этой антенны по сравнению с антенной АНК-1,1, имеющей оптимальный угол наклона рупора относительно зеркала.

Конструкция АНК-1,5 аналогична АНК-1,1. Антенна состоит (см. рис. 3.94 и 3.95) из зеркала, облучателя и экрана. Кроме них (при необходимости) в комплект антенны могут входить: подставка и чехол.

Зеркало антенны имеет следующие основные размеры (см. рис. 3.60): $D = 1,5 \text{ м}$, $F = 0,575 \text{ м}$, $x_1 = 0,3 \text{ м}$; $x_2 = 1,8 \text{ м}$.

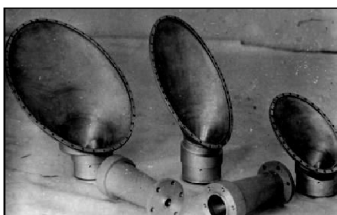


Рис. 3.96

Облучатели АНК-1.5 всех исполнений (см. рис. 3.95 и рис. 3.96) выполнены по схеме РРИПОКС с односкатным срезом раскрыва (см. раздел 1.6.2). Они отличаются друг от друга сечением волноводного выхода облучателя и геометрическими размерами, оптимизированными отдельно для каждого исполнения в полосе ОДЧ, а облучатель АНК-1,5/2 оптимизирован и по согласованию (см. раздел 1.7).

Наибольшие размеры имеет, естественно, облучатель АНК-1,5/2, который даже несколько затеняет нижнюю часть раскрыва зеркала (см. рис. 3.95). Однако на параметры антенны это существенного влияния не оказывает. Облучатели других исполнений антенны, включая АНК-1,5/11, расположены почти полностью вне раскрыва (см. рис. 3.94).

В комплект АНК-1,5/4-6, имеющей волноводный выход диаметром 70 мм, входят волноводные переходы, позволяющие (при необходимости) перейти на типовое сечение волновода диаметром 43 и 32 мм для диапазонов 6 и 8 ГГц.

Крышки, герметизирующие раскрыв облучателей, на стадии опытных образцов были изготовлены в двух вариантах: из радиопрозрачной пленки (см. рис. 3.96) и из пенопласта, упрочненного стеклотканью. Для эксплуатации был выбран второй вариант, как более прочный механически, хотя он и вносит потери порядка 0,1 — 0,2 дБ, а герметизация облучателя АНК-1,5/2 осуществляется путем заполнения части его объема пенополиуретаном малой плотности, упрочненным со стороны раскрыва слоем стеклоткани. Такой способ герметизации облучателя на 2 ГГц связан, во-первых, с большим абсолютным размером его раскрыва, а во-вторых, с тем, что в этом диапазоне влияние пенополиуретана на электрические параметры антенны практически отсутствует.

Экран предназначен для улучшения помехозащищенности антенны. Он присоединяется к нижней части зеркала и, в отличие от АНК-1,1 и макета АНК-1,5, имеет криволинейную кромку, что позволило дополнительно расфазировать создаваемое кромкой экрана дифракционное поле и, благодаря этому, дополнительно улучшить помехозащищенность антенны, особенно в горизонтальной плоскости.

Подставка с юстировочным устройством, позволяет плавно поворачивать и фиксировать антенну по углу места и по азимуту в пределах заданного сектора углов.

Юстировка антенны по углу места (в небольших пределах) может осуществляться только за счет поворота зеркала (облучатель при этом остается неподвижным), что и делает возможным юстировку антенны только за счет поворота зеркала. Такая возможность использована в АНК-1,5/2 при ее установке на мачте-волноводе (см. раздел 3.6.5).

Защита от атмосферных осадков АНК-1,5, как и АНК-1,1 осуществляется за счет конструкции самой антенны и ее элементов.

При выбранной конструкции, как показали проведенные исследования (см. раздел 3.5.6), на зеркале антенны и крышке облучателя возможно лишь незначительное скопление осадков в виде снега, льда или инея, причем в очень малом проценте времени. Поэтому в большинстве климатических районов страны антенна может эксплуатироваться без укрытия ее в целом. При необходимости предусматривается возможность укрытия антенны чехлом, изготовленным из гибкой тонкой радиопрозрачной пленки, которая практически не влияет на электрические параметры антенны.

Масса АНК-1,5 (из алюминиевых сплавов) отличается по исполнениям. АНК-1,5/2 без подставки весит 67 кг, с подставкой — 124 кг, а масса антенн других исполнений составляет ~50 кг — без подставки и ~80 кг — с подставкой.

Электрические параметры макета АНК-1,5/2 и трех других (серийных) исполнений АНК-1,5 приведены в таблице.

Антенна	ОДЧ, ГГц	D/λ _{ср}	KУ, дБ (f _{ср})	КИП	2θ _{0,5} (f _{ср})	ПБ, дБ	ЗД** дБ	КСВ	РДЧ*, ГГц	2r мм
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
АНК-1,5/2 Г	1,7÷2,1	9,5	27,2	0,59	6,7	<-22	>20	<1,06	1,6÷3,4	~140
В			27,2	0,59	7,3	<-24	>20	<1,05		
АНК-1,5/4-6 Г	3,4÷4,2	19,0	33,6	0,64	3,5	<-20	>26	<1,06	3,2÷8,4	70
В			33,6	0,64	3,8	<-22	>23	<1,05		
Г	5,67÷6,4	30,2	37,0	0,56	2,4	<-22	>35	<1,03		
В			37,0	0,56	2,4	<-24	>30	<1,04		

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
АНК-1,5/8	Г	7,9÷8,4	41,8	40,2	0,64	1,8	<-20	>30	<1,04	7,0÷11,7 32
	В			40,2	0,64	1,8	<-22	>25	<1,02	
АНК-1,5/11	Г	10,7÷11,7	56,0	43,0	0,64	1,1	<-22	>32	<1,04	9,3÷13,2 24
	В			43,0	0,64	1,1	<-22	>27	<1,02	

* РДЧ для АНК-1,5/2 указан предположительно, по аналогии с другими исполнениями антенн, т. к. данная антенна в пределах РДЧ не исследовалась

Значения параметров АНК-1,5 [40], как и АНК-1,1, соответствуют ТУ на эти антенны, и (по требованию завода-изготовителя) даны с большим производственным запасом, исключая АНК-1,5/2 [42]. Серийное производство последней было налажено позже и ее электрические параметры, приведенные в данной таблице, получены при испытании действующего макета (см. рис. 3.95).

Экспериментальные ДН макета АНК-1,5/2 в горизонтальной плоскости на горизонтальной (слева) и вертикальной (справа) поляризации, измеренные на самой низкой частоте рабочего диапазона (1,7 ГГц), где $D/\lambda = 8,5$ и уровень бокового излучения наиболее высок, показаны на рис. 3.97 (основные — сплошной линией, кросс-поляризационные — пунктиром).

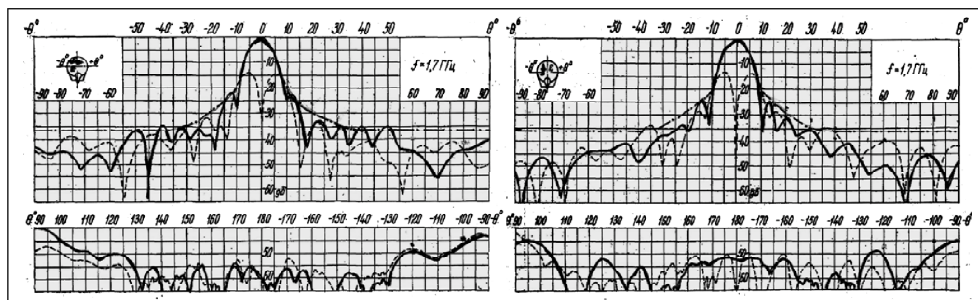


Рис. 3.97

Эти ДН, несмотря на очень малый относительный размер раскрыва, удовлетворяют с очень большим запасом ДН МСЭ (3.11) для РРЛ. На основной поляризации они удовлетворяют и универсальной ДН (3.15), показанной штрихпунктирной линией, причем в большей части заднего полупространства с запасом в 10 (и более) дБ, так как защитное действие этой совсем маленькой (в длинах волн) антенны более 20 дБ.

Сравнительно высокий (соизмеримый с основным) уровень бокового излучения при кросс-поляризации связан с малым относительным размером раскрыва этой антенны, определяющим большой вклад дифракционных полей.

Гарантированные диаграммы направленности (ГДН) АНК-1,5 всех исполнений в горизонтальной плоскости (основные и кросс-поляризационные), построенные, как и для АНК-1,1, путем обработки экспериментальных ДН нескольких антенн каждого исполнения, приведены на рис. 3.98 — 3.100. Эти ГДН даны без подразделения по поляризациям и соответствуют самому худшему случаю и по поляризации, и по частоте (в пределах ОДЧ), и по антенне, ДН которых учитывались при построении этих ГДН. Исключение составляет АНК-1,5/2, ГДН которых, построенные по результатам испытания макета, даны без особого производственного запаса.

Внимание! ГДН на рис. 3.98 — 3.100 даны в переменном масштабе.

Напомним, что реальный уровень бокового излучения АНК-1,5/4-6; АНК-1,5/8 и АНК-1,5/11 (по сравнению с приведенными ГДН) в подавляющей части кругового сектора углов полосы ОДЧ из-за большого производственного запаса, значительно ниже гарантированного.

Вне ОДЧ он равен или несколько выше ГДН в низкочастотной части РДЧ, где размер раскрытия в длинах волн уменьшается, а ДН облучателя в пл Е расширяется, но значительно ниже ГДН в высокочастотной части РДЧ, где размер раскрытия в длинах волн увеличивается, а ширина ДН облучателя сужается, причем на обеих поляризациях.

Уровень поля кроссполяризации АНК-1,5 несколько выше, чем АНК-1,1, из-за большей величины угла раствора исходного параболоида.

Уровень максимумов кроссполяризации равен $\sim (-13 \div 16)$ дБ, но в главном направлении кросс-поляризационное поле ниже -40 дБ. Поэтому при точной юстировке антенны развязка по кросс-поляризации в требуемом секторе углов составляет не менее 25 дБ.

Коэффициент усиления (КУ) и коэффициент использования (КИП) в полосе РДЧ как функция частоты показан на рис. 3.101.

Наибольшие значения КИП наблюдаются в полосе ОДЧ. В сторону высоких частот КИП плавно уменьшается. Примерно такая же тенденция

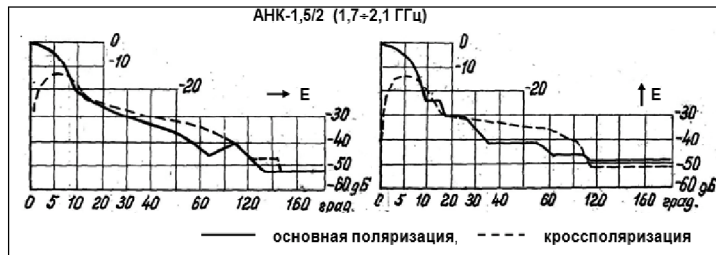


Рис. 3.98

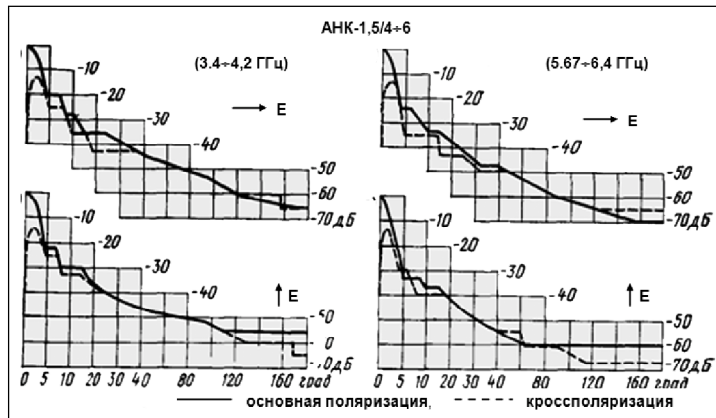


Рис. 3.99

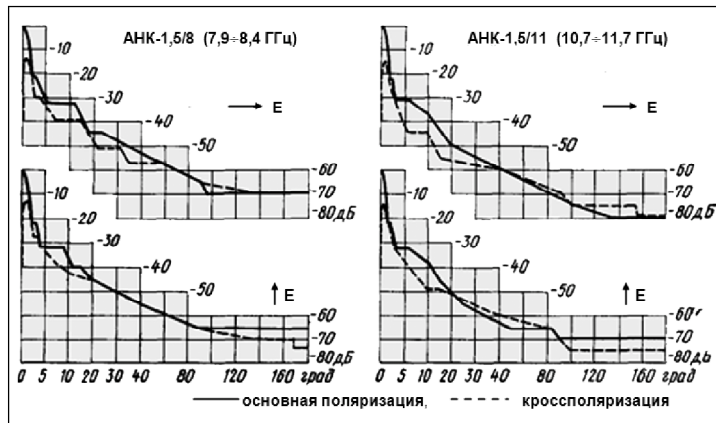


Рис. 3.100

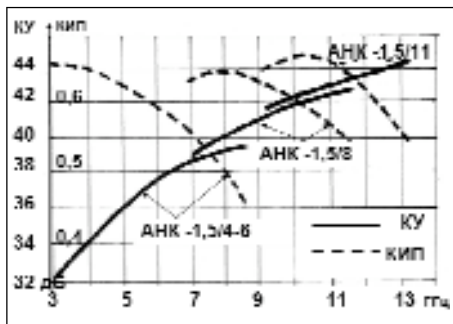


Рис. 3.101

наблюдается и в сторону нижних частот, но в эту сторону, как и у АНК-1,1, рабочий диапазон этой антенны ограничивается не КИП, а максимально допустимым увеличением КСВ. КИП всех исполнений АНК-1,5 в пределах ОДЧ равен $\sim 0,6 \div 0,65$, исключая диапазон $5,67 \div 6,4$ ГГц, где он падает до $0,55 \div 0,6$.

Согласование антенны с питающим трактом всех четырех исполнений антенны, в виде зависимости КСВ от частоты при горизонтальной (сплошная линия) и вертикальной (пунктир) поляризации показано на рис. 3.102.

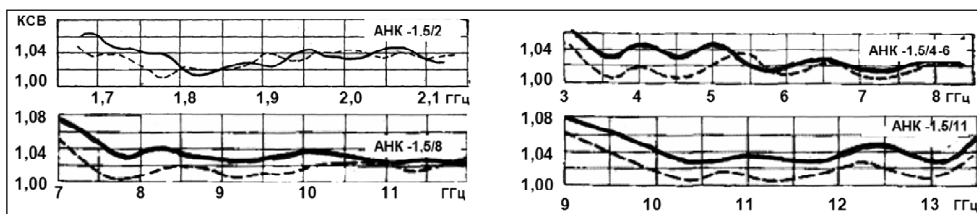


Рис. 3.102

Значения КСВ всех исполнений антенны в полосах ОДЧ ниже 1,04 на обеих поляризациях за исключением горизонтальной поляризации для АНК-1,5/2 и АНК-1,5/4-6 в ОДЧ диапазона 4 ГГц, где он в отдельных точках достигает значений 1,06 и 1,05, соответственно. В большей части полосы РДЧ всех исполнений КСВ ниже 1,05, а подъем КСВ на крайних нижних частотах при горизонтальной поляризации не выше 1,08.

Ширина главного лепестка по уровню половинной мощности ($2\theta_{0,5}$) в пределах РДЧ без подразделения по поляризациям, так как главный лепесток практически осесимметричен, показана на рис. 3.103.

Достоинства и недостатки АНК-1,5 аналогичны АНК-1,1, но к ее достоинствам добавляется вертикальный выход облучателя.

Основными достоинствами в части электрических параметров всех исполнений АНК-1,5 являются очень высокие, причем гарантированные, параметры, реализуемые даже при очень малых D/λ , таких как 8,5, 19 и 30.

Гарантированные электрические параметры всех исполнений АНК-1,5 (по принятой международной терминологии) удовлетворяют, причем с большим запасом, требованиям для антенн высокого качества, а реальные параметры, исключая уровень максимумов кросс-поляризации, соответствуют требованиям, предъявляемым к антеннам РРЛ сверхвысокого качества.

Основным недостатком в части электрических параметров является сравнительно высокий

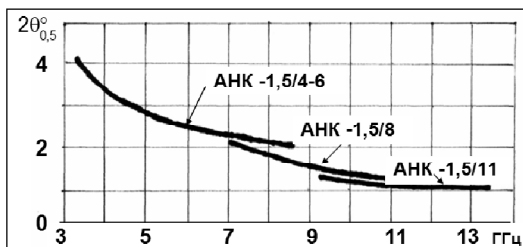


Рис. 3.103

уровень кросс-поляризационного излучения в горизонтальной плоскости, который характерен для РПА и АВО особенно с вертикальным выходом волновода, где используется короткофокусный исходный параболаид. Это делает проблематичным использование таких антенн, когда необходима очень высокая развязка по кросс-поляризации, что на практике встречается не часто.

Основными достоинствами в части конструкции (по сравнению с РПА при соизмеримых с ней или даже лучших электрических параметрах) являются значительно меньшие (соизмеримые с осесимметричными антеннами) габариты и масса, причем при наличии, как и у РПА, вертикального выхода облучателя. Кроме того, АНК-1,5 (в отличие от РПА) может эксплуатироваться без герметичного укрытия, а во многих климатических районах земного шара и вообще без укрытия антенны в целом, так как герметизировать необходимо лишь облучатель.

Основным недостатком в части конструкции (по сравнению с осесимметричными антеннами) является более сложная технология изготовления и вытекающая из этого, возможная повышенная стоимость.

3.6.4. Возможные области применения АНК-1,1 и АНК-1,5

Возможные области применения антенн АНК-1,1 и АНК-1,5 определяются их очень широким рабочим диапазоном и высокими электрическими параметрами, особенно в части помехозащищенности, при малых размерах и массе.

- Антенны АНК-1,1/8, АНК-1,1/11, АНК-1,5/8 и АНК-1,5/11, имеющие сравнительно высокий коэффициент усиления и очень высокую помехозащищенность, могут найти применение на узловых станциях для работы в нескольких радиальных направлениях.
- Антенны АНК-1,1/4, АНК-1,1/6, АНК-1,1/4-6, имеющие сравнительно малый коэффициент усиления, но высокую помехозащищенность, целесообразно использовать при строительстве ответвлений (небольшой протяженности) от существующих или вновь строящихся радиорелейных станций, если они по коэффициенту усиления отвечают предъявляемым требованиям.
- Плавная (без осцилляций) и устойчивая зависимость КУ от частоты, характерная для АНК, малая масса и небольшие габариты дают возможность применять их и в качестве эталонных антенн при измерении коэффициента усиления.
- Широкая полоса частот, в пределах которой каждый вариант исполнения АНК сохраняет высокие электрические параметры, позволяет использовать эти антенны в самых разных системах связи, работающих в полосе частот 1,6÷13,25 ГГц.
- АНК-1,5 (благодаря вертикальному выходу облучателя) могут использоваться в тех случаях, когда аппаратура установлена внизу высокой опоры и соединена с антенной при помощи жесткого вертикального волноводного тракта.
- АНК-1,5 с волноводом большого сечения, в частности, с волноводом диаметром ~140 мм и 70 мм, может использоваться в системе типа «Шпора», где волноводная труба, расчаленная растяжками, служит для антенны и мачтой-опорой.

3.6.5. Использование АНК-1,5 со шпренгельной мачтой-волноводом

АНК-1,5 была использована со шпренгельной мачтой [65], разработанной д.т.н. А. А. Воеводиным, в которой волновод, укрепленный шпренгелями и растяжками, является несущей конструкцией, а к верхней его части присоеди-



Рис. 3.104

няется антенна, рис. 3.104. Центр тяжести этой антенны должен быть хорошо сбалансирован и АНК-1,5, имеющая вертикальный выход волновода, стыкуется с такой мачтой-волноводом наиболее гармонично. Однако (при наличии изгиба) возможно использование и АНК-1,1.

Успешно прошли электрические испытания действующие макеты шпренгельной мачты-опоры с АНК в диапазоне 8 ГГц, где в качестве мачты-опоры использовался типовой волновод диаметром 70 мм. При этом облучатель антенны имел волноводный выход диаметром 32 мм и присоединялся к многомодовому волноводу диаметром 70 мм посредством конического перехода, который служил одновременно несущей конструкцией. Все электрические параметры

этой системы отвечали заданным требованиям, несмотря на использование в ней длинного многомодового волновода. Связь была устойчивой, хотя во время проведения испытаний скорость ветра достигала иногда $18 \div 20$ м/сек. Но так как время завершения данной разработки совпало с началом перестройки СССР, то ее внедрение в серийное производство не состоялось. Несколько позже был разработан и испытан действующий макет мачты-волновода диаметром ~ 140 мм, где использовалась АНК-1,5/2 (см. рис. 3.104).

В серийное производство с мачтой-волноводом была внедрена антенна АНК-1.5/2, которая входит в состав аппаратуры «Пихта-2», выпускаемой серийно ОАО Владимирского завода «Электроприбор».

3.6.6. Использование АВО в перископических системах

Перископические антенные системы [2] целесообразно использовать при установке антенн на очень высоких опорах и расположении аппаратуры внизу, когда использование волноводного тракта по каким-либо причинам невозможно или нежелательно.

Перископическая антенная система, рис. 3.105, состоит из нижнего зеркала-излучателя, расположенного на земле, и верхнего зеркала-переизлучателя, установленного на опоре. В качестве нижнего может быть использовано осесимметричное зеркало, но предпочтительнее использовать АВО, так как в этом случае проблемы, связанные с его защитой от атмосферных осадков, во многих случаях вообще отпадают или значительно упрощаются.

Качество работы перископической антенной системы определяется многими факторами. Среди них немаловажную роль играют направленные свойства облучателя нижнего зеркала, который в очень большой степени определяет

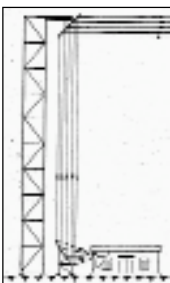


Рис. 3.105

помехозащищенность АВО, с улучшением которой уменьшается и уровень помех, определяемых отражением энергии от конструкции опоры.

При использовании АВО облучатель можно установить как непосредственно в техническом здании (см. рис.105), так и вне его, и габариты облучателя в этом случае особого значения не имеют. Поэтому ничто не мешает использовать в качестве облучателя нижнего зеркала РРИ, преимущества которого в части электрических параметров по сравнению, например, с обычным синфазным рупором неоспоримы.

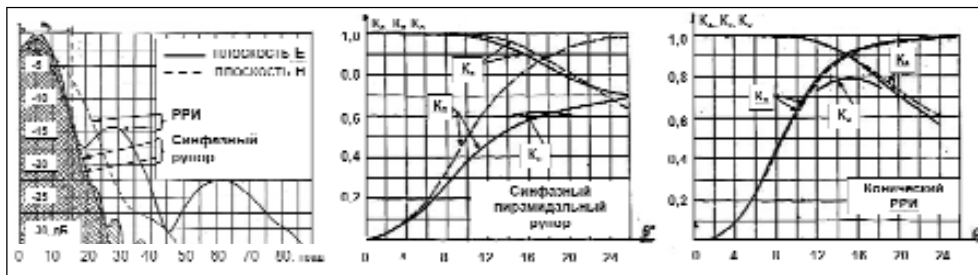


Рис. 3.106

На рис. 3.106, слева показаны на обеих поляризациях в переднем полупространстве ДН обычного пирамидального синфазного рупора, который использовался в одной из перископических антенных систем, и ДН конического РРИ (они заштрихованы), которым синфазный рупор был заменен [53].

Размеры РРИ: $2R_2 = 9,2\lambda$, $2\alpha_2 = 35^\circ$, $2R_1 = 2,9\lambda$, $2\alpha_1 = 10^\circ$.

Размеры синфазного рупора: $2R = 2,8\lambda$, высота $h = 6\lambda$. Угол облучения кромки зеркала $\theta_k = 16^\circ$.

На рис. показаны результаты расчета КИП (апертурного — K_a , перехвата — K_p и общего — K_o) по экспериментальным ДН.

При замене синфазного рупора на РРИ (см. рис. 3.106, в центре и справа), при почти одинаковом апертурном КИП (K_a) общий КИП (K_o) увеличился от 0,62 до 0,8 за счет сильного увеличения коэффициент перехвата (K_p) — от 0,7 (по среднему по поляризациям значению) до 0,9. Коэффициент рассеяния при использовании РРИ составляет всего 10 %, что приводит к значительному улучшению помехозащищенности перископической антенной системы в целом.

Реальный КИП близок к расчетному, так как в данной системе нижнее зеркало очень длиннофокусное и имеет большой относительный размер раскрыва, поэтому кросс-поляризационные и дифракционные потери малы.

При некотором (вполне допустимом) снижении K_o , например, до величины 0,75 ($\theta_k = 18^\circ$) коэффициент рассеяния уменьшится до 3...5%, что может дать дополнительное улучшение помехозащищенности.

3.7. АВО для земных станций спутниковых систем

3.7.1. Требования, предъявляемые к антеннам ЗС спутниковых систем

Имеется большое количество радиосистем, принадлежащих разным, быстро развивающимся, спутниковым радиослужбам, включая фиксированную спутниковую службу (ФСС) и вещательную спутниковую службу (ВСС). Для каждой службы определены полосы частот, которые, как правило, совмещены с другими службами. В направлении Земля-Космос и Космос-Земля полосы частот различны. Различаются они и для разных Районов земного шара. Максимально освоены диапазоны 4/6, 11/14, 12/18 ГГц и уже осваиваются диапазоны 20/30 ГГц. В разных радиослужбах применяются различные антенны земных станций (ЗС).

Диаметр антенн ЗС ФСС составляет примерно 3 — 12 м. Малые антенны земных станций (0,5 — 3 м) применяют в распределительных сетях ВСС и на ЗС подвижных служб, обладающих малой пропускной способностью. Однако, бла-

годаря совершенствованию бортовой аппаратуры, возможность использования антенн малого диаметра увеличивается как для ВСС, так и для ФСС.

Особое внимание уделяется направленным свойствам антенн, так как именно они определяют степень использования геостационарной орбиты (ГО), где уже наблюдается большая насыщенность.

Общие требования, предъявляемые к электрическим параметрам земных антенн, используемых в спутниковых системах:

- Низкий уровень бокового излучения в переднем полупространстве (увеличение пространственной избирательности антенны), определяющий, в конечном итоге, качество приема при заданном угловом разnose спутников или минимально возможный угловой разнос спутников при заданном качестве приема.
- Максимально возможная ширина рабочего диапазона, определяющая возможность использования одной и той же антенны в разных службах и/или районах земного шара, а также возможность приема одной антенной нескольких станций ВСС.
- Максимальная возможная помехозащищенность антенны в целом, включая заднее полупространство, определяющая шумовую температуру антенны, при заданной эффективности.
- Максимально возможная эффективность при заданной помехозащищенности.
- Максимально возможная (при заданном коэффициенте усиления) ширина главного лепестка антенны по уровню половинной мощности ($2\theta_{0,5}$), которая определяет стабильность работы системы при отклонении спутника из расчетной точки.
- Минимально возможный уровень кросс-поляризации вблизи направления главного излучения, определяющий защищенность системы от приема помехи другой поляризации, так как при планировании размещения спутников на орбите учитывается и кросс-поляризационная развязка.
- Минимально возможный коэффициент стоячей волны на входе облучателя.

Приведенные выше (весьма противоречивые) требования являются общими, к которым, по возможности, следует стремиться, но очень трудно реализовать в полном объеме. Поэтому при разработке конкретных антенн, как правило, находят компромиссные варианты, а поэтому некоторые из этих требований могут быть более жесткими, а другие — более мягкими, в зависимости от конкретных требований, предъявляемых к антеннам той или иной системы или к данной конкретной антенне. Наиболее мягкие требования в большинстве случаев предъявляются к согласованию антенн ЗС с питающим трактом.

Кроме того, приемные антенны для индивидуального и коллективного приема системы ВСС должны быть простыми по конструкции, надежными в эксплуатации и дешевыми, так как они уже стали изделиями «массового спроса».

Далее, более подробно, остановимся на некоторых, наиболее важных, требованиях из перечисленных выше.

Требования к пространственной избирательности антенн вызваны необходимостью увеличения емкости геостационарной орбиты (ГО). В общем случае пространственная избирательность определяется уровнем максимумов и скоростью спада боковых лепестков. Например [66], увеличение скорости спада в 1,5 раза или снижение уровня боковых лепестков до величины:

$$G(\theta) = 25 - 25 \lg \theta \quad (3.20)$$

приводит к сокращению угла разноса спутников примерно вдвое и соответственно к удвоению емкости геостационарной орбиты (ГО).

Увеличение пространственной избирательности является весьма сложной задачей, так как (при прочих равных условиях) скорость спада ближних (апертурных) лепестков, определяемая отношением D/λ , по мере увеличения эффективности увеличивается, а их уровень (и уровень дифракционных лепестков, зависящий от распределения амплитуды поля в раскрыве (от уровня облучения кромки зеркала), при увеличении эффективности, наоборот, повышается. Поэтому всегда приходится искать некое компромиссное решение.

При существующей (большой) насыщенности ГО спутниками увеличение пространственной избирательности антенн ЗС является первоочередной задачей, которая решается уже в течение примерно двух десятилетий.

Требования по кроссполяризации тоже связаны с увеличением емкости ГО за счет разделения сигналов по поляризациям, что достигается при излучении сигналов с ортогональной поляризацией — либо линейной в двух ортогональных плоскостях, либо вращающейся с разным направлением вращения.

Расширение рабочего диапазона является весьма важной задачей, так как делает антенну универсальной и обеспечивает возможность ее использования разными радиослужбами, а также для работы в разных Районах земного шара систем ФСС и ВСС, где рабочие полосы частот сдвинуты относительно друг друга.

Многие требования, предъявляемые к антеннам спутниковых служб, зафиксированы соответствующими документами, принятыми Всемирными и региональными конференциями МСЭ. Некоторые из этих документов приведены в разделе 3.1, где дана и универсальная ДН, наиболее полно отвечающая наиболее строгим требованиям, предъявляемым (на сегодня) к антеннам разных служб, включая антенны ЗС.

Ведущие фирмы при разработке новых антенн (вне зависимости от их размера и принадлежности к той или иной спутниковой системе) стремятся удовлетворить или даже превзойти наиболее жесткие требования, чтобы сделать свои антенны конкурентоспособными. В части малых антенн ЗС предпочтение отдано ими антеннам, выполненным по схеме АВО.

Преимущества АВО с точки зрения их использования в качестве антенн ЗС спутниковых систем:

- Отсутствие затенения раскрыва антенны облучающей системой и элементами ее крепления позволяет получить (при высоком КИП) наиболее низкий уровень первого и ближних боковых лепестков даже при очень малых относительных (в длинах волн) размерах основного зеркала.
- Отсутствие затенения раскрыва дает возможность создания спадающего или даже специального распределения амплитуды поля в раскрыве, что позволяет (при высокой эффективности) получить широкий главный лепесток в сочетании с низким уровнем боковых.
- Низкий уровень бокового излучения антенны в целом обеспечивает низкую шумовую температуру антенны.
- Низкий уровень ближних (апертурных) лепестков и быстрая скорость их спада позволяет увеличить емкость геостационарной орбиты.
- Меньшие требования к точности установки облучателя (антенны, выполненные по схеме АВО при равном с осесимметричной антенной диаме-

тре раскрыва эквивалентны более длиннофокусным осесимметричным антеннам) делают работу антенны более надежной.

- Конструкция антенны, выполненной по схеме АВО (наклонное расположение поверхности зеркала и крышки облучателя относительно горизонта) обеспечивает возможность эксплуатации этих антенн без укрытия почти во всех районах земного шара, исключая лишь высокогорные районы вблизи экватора.

Недостатки АВО:

- Сложность изготовления при больших (больше 2÷3 м) размерах зеркала.
- Повышенный (по сравнению с длиннофокусными осесимметричными антеннами) уровень максимумов кросс-поляризации при работе антенны на линейной поляризации (на круговой поляризации, как уже было сказано многократно, кросс-поляризационные характеристики АВО значительно лучше, чем у осесимметричных антенн).

Как уже отмечалось, уровень максимумов кросс-поляризации АВО в поперечной плоскости примерно соответствует максимумам кросс-поляризации осесимметричной антенны, имеющей угол раствора зеркала равный углу раствора исходного параболоида, из которого «вырезано» зеркало АВО, т. е. зеркалу, угол раствора которого примерно в два раза больше угла раствора АВО. Однако (при соответствующем выборе геометрических размеров) АВО и на линейной поляризации удовлетворяет требованиям, предъявляемым к антеннам ЗС спутниковых систем.

Из сказанного выше совершенно очевидно, почему АВО малого диаметра, выполненные по однозеркальной схеме, получили самое широкое распространение в ВСС. Ниже приведены результаты разработки двух антенн для приема спутникового телевизионного вещания, выполненных по схеме АВО: антенны с диаметром раскрыва 1,1 м и антенны с диаметром раскрыва 1,5 м, предназначенных для работы в диапазонах частот, выделенных для спутниковых систем.

3.7.2. АСТВ с диаметром раскрыва 1,1 м

Макет антенны [39] для приема спутникового телевизионного вещания с диаметром раскрыва 1,1 м (АСТВ-1,1) был предназначен для работы в РДЧ — расширенном диапазоне частот (11,4 — 14 ГГц), включающем в себя несколько полос ФСС и ВСС, выделенных для разных Районов земного шара. По результатам



Рис. 3.107

исследования этого макета были разработаны и внедрены в серийное производство несколько типоразмеров АСТВ, выполненных по однозеркальной схеме АВО.

В общем случае АСТВ (рис. 3.107) состоит из отражающего зеркала, облучателя, укрепленного на кронштейне, и подставки с юстировочным устройством. Конструкция кронштейна, подставки и юстировочного устройства может быть различной в зависимости от способа установки антенны (на горизонтальной площадке или прикрепленной к вертикальной стене). В отличие от АВО, предназначенных для работы на РРЛ, экран в антеннах АСТВ отсутствует, так уровень их дальнего и заднего излучения требованиям по помехозащищенно-

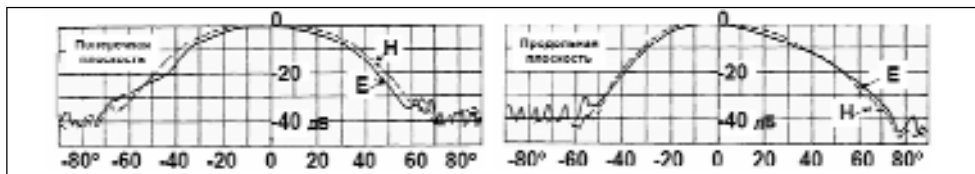


Рис. 3.108

сти удовлетворяет и без экрана. Схема антенны обеспечивает возможность ее эксплуатации без укрытия, так как вероятность скопления осадков в виде дождя и снега на крышке облучателя и на поверхности зеркала (при ориентировке антенны на спутник) практически отсутствует.

Зеркало макета антенны, заимствованное от серийной АНК-1,1, имеет следующие размеры: $D = 2R = 1,1$ м, $F = 0,5$ м, $x_1 = 0,1$ м; $x_2 = 1,2$ м и затенение раскрыва антенны облучателем, предназначенным для этого диапазона, практически исключено.

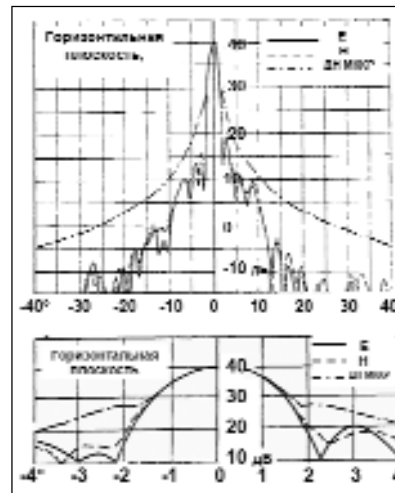
Облучатель выполнен по схеме РРИ-ПОКС (см. раздел 1.62) и оптимизирован для средней частоты ОДЧ ($11,7 \div 12,5$), его ДН показаны на рис. 3.108.

В поперечной плоскости ДН симметричны (см. рис. 3.108, слева), а в продольной — асимметричны (см. рис. 3.108, справа). Они практически одинаковы на обеих поляризациях (Е и Н) и имеют низкий уровень бокового излучения, отвечая требованиям, предъявляемым к ДН облучателя АВО.

Коэффициент усиления, измеренный на линейной поляризации, на частоте 11,7 ГГц (на нижней частоте ОДЧ, где $D/\lambda = 42,9$) равен 41,0 дБ, что соответствует КИП близкому к 0,7.

ДН антенны на круговой поляризации в поперечной плоскости на частоте 11,9 ГГц ($D/\lambda \approx 43,6$) при правом (сплошная линия) и левом (пунктир) вращении даны (относительно уровня изотропного излучения) на рис. 3.109. Вверху — для сектора углов, где уровень сигнала выше уровня шумов измерительной установки (выше -15 дБи), внизу (в увеличенном масштабе) — вблизи направления главного излучения.

Рис. 3.109



ДН антенны на линейной поляризации в поперечной и продольной плоскости показаны соответственно на рис. 3.110 и 3.111 (Е — слева, Н — справа). Эти ДН (благодаря осесимме-

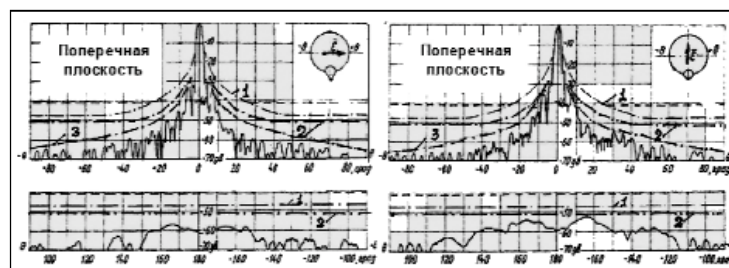


Рис. 3.110

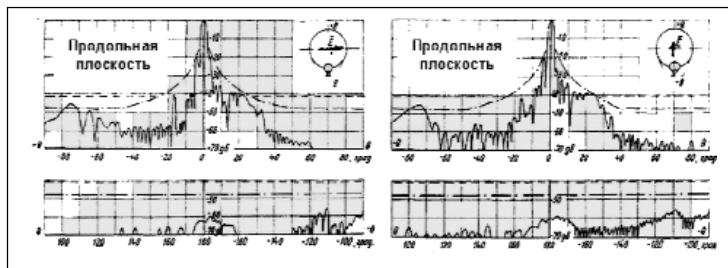


Рис. 3.111

тричному распределению амплитуды поля в раскрыве) на обеих поляризациях практически одинаковы и идентичны ДН на круговой поляризации.

На рис.
3.109...3.111

штрихпунктирной линией (на рис. 3.110 — линией 1) показана ДН МСЭ для антенн ЗС, действующая во время разработки данной антенны (1983 — 1984 гг.), когда уровень апертурных лепестков определялся по формуле: $G(\varphi) = 52 - 10\log(D/\lambda) - 25\log\varphi$. Пунктирной линией на рис. 3.110 и 3.111 приведен уровень изотропного излучения данной антенны.

Штрихпунктирной линией 2 на рис. 3.110 показана универсальная ДН (3.15), а линией 3 — перспективная: $G(\theta) = 25 - 25\log\theta$, которая рекомендована как цель, к которой следует стремиться при разработке новых антенн ЗС, чтобы увеличить емкость геостационарной орбиты.

Сравнение показывает, что уровень бокового излучения данной антенны в обеих плоскостях и на обеих поляризациях ниже старых ДН МСЭ на $10 \div 15$ дБ в подавляющем секторе углов, и на 20 — 25 дБ ниже изотропного уровня. Кроме того, в поперечной плоскости (она при соответствующем расположении антенны относительно геостационарной орбиты являются определяющей) уровень апертурных лепестков удовлетворяет (с запасом) и универсальной ДН (кривая 2), и целевой (кривая 3).

Кросс-поляризационные характеристики при работе антенны на линейной и круговой поляризации, как уже было сказано, отличаются принципиально. Напомним, что на круговой поляризации АВО не имеет кросс-поляризационных максимумов вблизи направления главного излучения, а на линейной они весьма высоки и зависят от угла раствора исходного параболоида.

Однако для антенн ЗС, которые используются без защитного экрана, и нет необходимости в минимизации его габаритов и/или в вертикальном выходе облучателя, геометрические размеры зеркала можно выбрать таким образом, что требование по кросс-поляризации (3.16) выполняется без особых проблем, что и было сделано в антеннах АСТВ, внедренных в серийное производство, где в качестве исходного использован менее глубокий параболоид, чем в антеннах для РРЛ.

При испытании антенны АСТВ-1,1 на круговой поляризации уровень максимумов кроссполяризации определялся кросс-поляризационными характеристиками поляризатора, а не антенны. С одним из поляризаторов он был получен ниже -20 дБ, а с другим — ниже -23 дБ. Так как вклад антенны, выполненной по схеме АВО, в кросс-поляризационное излучение системы, работающей на круговой поляризации значительно меньше указанных величин (теоретически равен нулю), поэтому при использовании этих поляризаторов заметить его было невозможно.

Коэффициент отражения ($\Gamma, \%$), измеренный на входе облучателя при работе антенны на линейной поляризации, показан на рис. 3.112.

В пределах ОДЧ ($11,7 \div 12,5$ ГГц) на поперечной поляризации (сплошная линия) коэффициент отражения ниже 1,7 %, на продольной (пунктир) — ниже 1, 2 %, а в пределах всего РДЧ ($11,4 \div 14,0$ ГГц) — ниже 2 %.

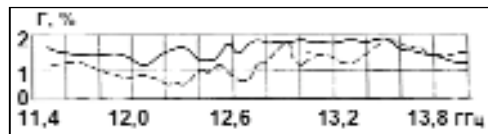


Рис. 3.112

Шумовая температура антенны, рассчитанная по огибающей максимумов боковых лепестков ДН, измеренной в продольной плоскости, где уровень бокового излучения наиболее высок, при угле возвышения 10° ниже 30К, а при угле 40° — ниже 11К.

Фактическая шумовая температура меньше указанных значений, так как уровень бокового излучения во всех других плоскостях значительно ниже, чем в плоскости, заложенной в расчет.

Таким образом, очень простая однозеркальная АВО (с $D/\lambda \approx 44 \div 46$) в пределах ОДЧ), в которой в качестве облучателя использована одна из модификаций РРИ, имеющего гладкие (без канавок) стенки и не требующего высокой точности изготовления и установки, позволила получить весьма высокие электрические параметры.

Параметры данного макета антенны и разработанных на его основе нескольких типоразмеров антенн АСТВ, внедренных затем в серийное производство, удовлетворяют не только требованиям, предъявляемым к антеннам данного назначения на момент их разработки (начало 80-х годов прошлого века), но и современным. По некоторым параметрам, включая ширину рабочего диапазона, эти антенны превосходят многие современные, предназначенные для той же цели.

3.7.3. АСТВ-1,5 с диаметром раскрыва 1,5 м

Антенна для приема спутникового телевизионного вещания с диаметром раскрыва 1,5 м (АСТВ-1,5) [44] как и другие типоразмеры АСТВ, выполнена по схеме АВО, рис. 3.113, и обладает всеми достоинствами, присущими антеннам этого типа (см. раздел 3.7.1).

При наличии двух сменных облучателей эта антенна способна работать в двух очень широких полосах частот: $3,4 \div 8,4$ ГГц и $10,6 \div 14,8$ ГГц, крайние частоты которых, отличающиеся соответственно почти в 2,5 и 1,4 раза, перекрывают несколько частотных полос, выделенных ФСС и ВСС для разных Районов земного шара.

Облучатель АСТВ-1,5 для высокочастотного диапазона ($10,6 \div 14,8$ ГГц) выполнен по схеме РРИПОКС, рис. 3.114, слева, а для низкочастотного ($3,4 \div 8,4$ ГГц) — по схеме осесимметричного РРИ (см. рис. 3.114, справа). Кроме того, для полосы $10,65 \div 12,75$ ГГц был дополнительно разработан специальный облучатель, выполненный в виде осесимметричного РРИнк (с насадкой, имеющей канавки).

Диаграммы направленности антенны в переднем полупространстве поперечной плоскости на поперечной (слева) и продольной (справа) поляризации показаны на рис. 3.115 — 3.119.



Рис. 3.113

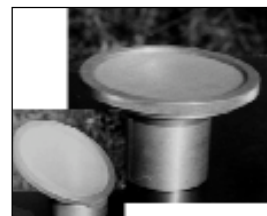


Рис. 3.114

На этих же рисунках (штриховой линией) показаны ДН МСЭ в секторе ближнего излучения (см. раздел 3.1), соответствующие (3.6) и универсальной (3.15), приведенные по (3.14) к уровню максимального излучения антенны.

Диаграммы направленности антенны с низкочастотным облучателем (см. рис. 3.115 и 3.116) измерены на частоте 3,8 ГГц и 6,0 ГГц.

В диапазоне 4 ГГц, (см. рис. 3.115), несмотря на очень малый относительный размер раскрыва ($D/\lambda \approx 19$) ДН (основные и кросс-поляризационные) удовлетворяют с запасом универсальной, наиболее жесткой, ДН (3.15 и 3.16).

В диапазоне 6 ГГц (см. рис. 3.116), где $D/\lambda \approx 30$, ДН антенны удовлетворяют не только наиболее жестким (современным) справочным ДН МСЭ (пунк-

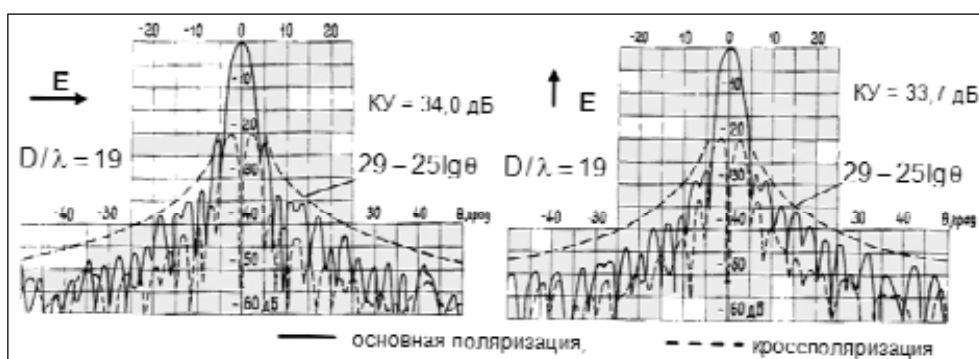


Рис. 3.115

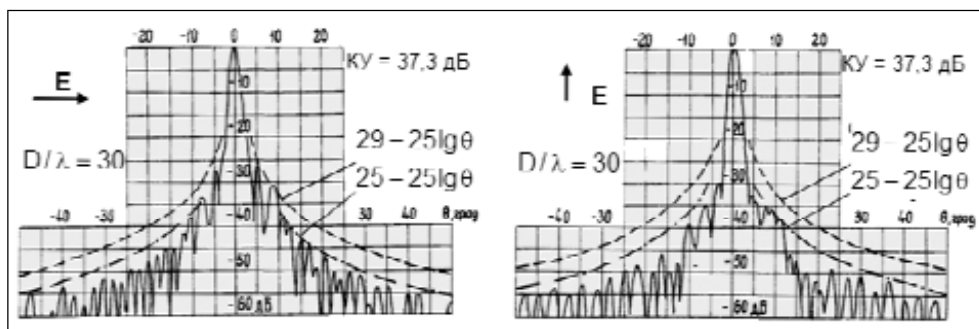


Рис. 3.116

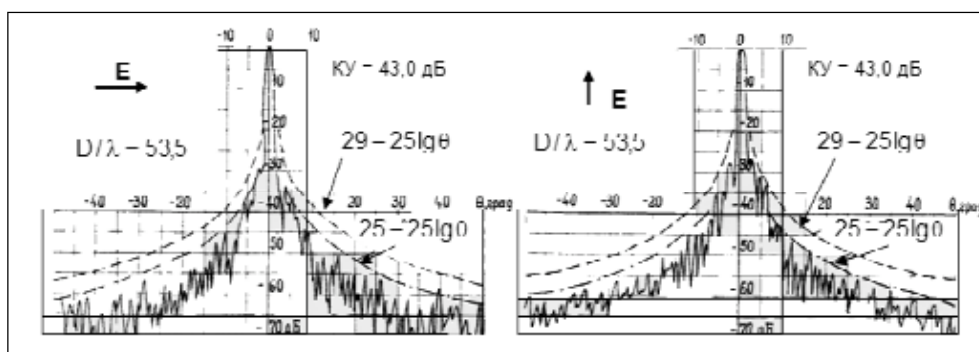


Рис. 3.117

тир), но и целевой (штрихпунктирная линия), позволяющей значительно увеличить емкость геостационарной орбиты (3.20).

Диаграммы направленности антенны с высокочастотным облучателем (см. рис. 3.117 и рис. 3.118) измерены на частоте 10,7 ГГц ($D/\lambda \approx 53,5$) и 14,5 ГГц, ($D/\lambda \approx 72,5$).

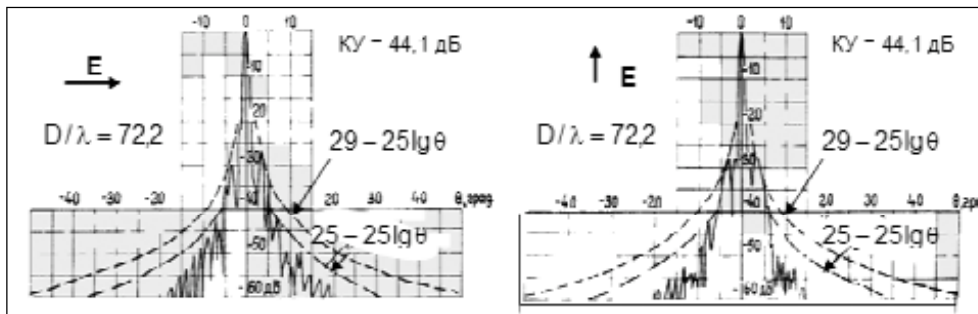


Рис. 3.118

Эти ДН также удовлетворяют не только (3.6) и (3.15), но и (3.20) — штрихпунктирная линия, рассматриваемой в качестве перспективы, причем в диапазоне 14 ГГц, ($D/\lambda \approx 72,5$), где КИП антенны снижается до 0,5 — 0,55, — с солидным запасом

Диаграммы направленности антенны со специальным облучателем (см. рис. 3.119), измеренные на частоте 11,25 ГГц ($D/\lambda \approx 56$), практически вписываются даже в диаграмму (точки), которая на 5 дБ ниже уровня перспективной ДН МСЭ: $G(\theta) = 20 - 25 \lg \theta$.

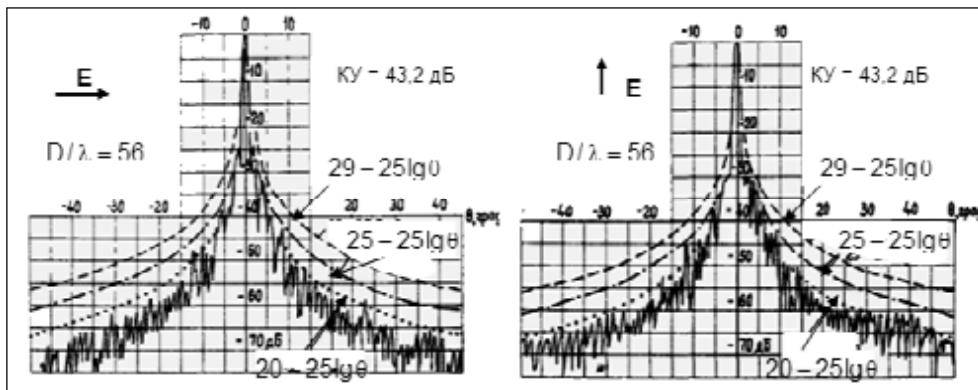


Рис. 3.119

Согласование антенны в сильной степени зависит от диаметра волновода в длинах волн и ухудшается с его уменьшением. Но даже при принятом для антенн спутниковых систем (небольшом) относительном диаметре волновода, равном $\approx 0,85\lambda$, КСВ на входе облучателя ни с одним из облучателей не превышает значения 1,06. При желании КСВ может быть уменьшен до $1,04 \div 1,05$ только за счет увеличения диаметра волновода в длинах волн.

КИП антенны колеблется (в основном) в пределах $0,6 \div 0,7$, и даже на самой высокой частоте (14,5 ГГц) он не опускается ниже 0,5, несмотря на то, что антенна оптимизирована по эффективности для 10,6 ГГц.

3.8. О соответствии разработанных антенн современным требованиям

Большинство рассмотренных в этой главе зеркальных антенн по своим параметрам не уступает лучшим современным антеннам аналогичного назначения, а некоторые из них даже превосходят то, что достигнуто к настоящему времени, хотя со времени их разработки прошло уже 20 (и более) лет.

Многого удалось добиться за счет использования в качестве облучателей этих антенн различных модификаций РРИ, разработанных в те же годы, а также благодаря тому, что в процессе работы постоянно отслеживалось состояние мирового уровня антенной техники за соответствующий период [17] [18] [27] и определялись основные тенденции ее дальнейшего развития [43]. Основные тенденции, включая увеличение помехозащищенности, сохранились и поныне. Однако, вследствие разработки более совершенной аппаратуры, требования к антеннам ужесточаются уже со значительно меньшей скоростью, чем это было раньше, когда основную «ответственность» за обеспечение качественной работы той или иной системы в целом старались переложить на плечи «крайнего», т. е. на антенну.

Подводя итог данной главы, перечислим основные достоинства большинства рассмотренных выше антенн:

- Очень широкий рабочий диапазон (полуторный, двукратный и более).
- Хорошая эффективность (КИП — 0,6 — 0,7) при очень высокой помехозащищенности, отвечающей самым строгим требованиям.
- Хорошее согласование с питающим трактом (КСВ ниже 1,04 — 1,06).
- Простота схемы и оптимизации параметров.
- Относительно малые размеры и материалоемкость.
- Реализация высоких электрических параметров не только при больших, но и при очень малых относительных размерах антенны, вплоть до $D/\lambda \approx 8 \div 10$.

Наибольший интерес представляют, пожалуй, следующие антенны:

Широкодиапазонная АВО (см. раздел 3.5.3), способная работать почти в четырехкратной непрерывной полосе частот.

АВО с эллиптическим и полукруглым раскрывом (см. раздел 3.5.4), позволяющие получить существенно отличающиеся по ширине главные лепестки в двух взаимно перпендикулярных плоскостях и снизить уровень бокового излучения в поперечной (горизонтальной) плоскости при весьма высоких остальных параметрах антенны.

АН-1,5 с оптимальной формой раскрыва (см. раздел 3.5.5), обеспечивающая очень высокую помехозащищенность, включая сектор первых, апертурных и задних лепестков, при хорошей эффективности.

АНК-1,5 с вертикальным выходом для РРЛ (см. раздел 3.6.3), три исполнения которой, отличающихся только облучателем, обеспечивают (с перекрытием) работу в полосе 1,7 — 13,5 ГГц с очень высокими электрическими параметрами.

АСТВ-1,5 для ЗС спутниковых систем (см. раздел 3.7.3), отличающаяся (при хорошей эффективности) очень высокой помехозащищенностью в секторе ближних (апертурных) лепестков, определяющих пространственную избирательность и влияющих на насыщение спутниками геостационарной орбиты.

АНК-1,5/2 вошла в состав аппаратуры «Пихта-2», выпускаемой ОАО Владимирским заводом «Электроприбор». Антенны АНК-1,1 и АНК-1,5 разных исполнений, а также АСТВ нескольких типоразмеров были внедрены в серийное

производство и выпускались заводом «Промсвязь» (г. Ахтырка, Сумская область), который в СССР был основным поставщиком антенн для РРЛ. Но, спустя некоторое время после развала СССР, этот завод переименовался в ОАО «Нефтепроммаш» и перепрофилировался на выпуск оборудования для нефтяной промышленности, а какая судьба постигнет выпускаемые этим заводом антенны — неизвестно. Поэтому отечественную (российскую) антенную промышленность, как, впрочем, и научные разработки в этой области придется, видимо, возрождать заново.

В этой главе даны практические рекомендации по разработке антенн и оптимизации их параметров. Пользуясь ими можно не только «тиражировать» уже реализованные антенны применительно к другим диапазонам частот и типоразмерам, но и продолжить исследования в тех направлениях, которые здесь только намечены, потому что их дальнейшая проработка была прервана «перестройкой», которая помешала не только перейти к новым научным работам, но и завершить уже начатые.

Заключение

Жизнь продолжается и ставит перед человечеством все новые и новые задачи.

В области антенной техники первоочередной задачей (уже сегодня) является разработка и производство антенн, работающих во все более и более высоких диапазонах частот. При решении этой задачи можно использовать уже накопленный опыт в части разработки и производства антенн разных типов, включая антенны (и рупорные облучатели для них), рассмотренные в этой части данной книги.

Но если кого-то «повторение пройденного» не устраивает, то в антенной науке и технике есть еще одна, совершенно не изученная область, исследование которой только начинается. Это естественные антенны, созданные самой Природой, которые, как показали даже самые первые шаги, сделанные в этом направлении, гораздо совершеннее искусственных антенн, разработанных и изготовленных человеком.

Изучение естественных антенн позволит не только найти множество прообразов для создания искусственных антенн нового поколения, но и посмотреть на наш Мир и на себя в этом мире совершенно другими глазами.

Все, кого интересует НОВОЕ, могут познакомиться со второй частью данной книги, которая также посвящена антеннам, но таким, которые ПОКА антеннами не называются.